

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Vliv řezných parametrů na mikrotvrdost povrchu
při vysokých rychlostech řezání

Influence of Cutting Parameters on Surface
Microhardness at High Speed Cutting

Student: Bc. Martin Pelant

Vedoucí diplomové práce:

Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Pelant

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

Vliv řezných parametrů na mikrotvrдость povrchu při vysokých
rychlostech řezání
Influence of Cutting Parameters on Surface Microhardness at High
Speed Cutting

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky řezání vysokými rychlostmi.
2. Hodnocení mikrotvrđosti povrchu po obrobení.
3. Návrh a provedení experimentální části práce.
4. Měření a statistické vyhodnocení dat.
5. Zhodnocení a shrnutí přínosů pro praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] ERDL, BERT P. *High-speed machining*. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineering, 2003. ISBN 0-87263-649-6.
- [5] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [6] ZELENÝ, J. Vysokorychlostní obrábění. *MM průmyslové spektrum*. 2000. ISSN 1212-2572.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20. 5. 2011.....

Michal Markin.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :20.5.2011


.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Martin Pelant

Adresa trvalého pobytu autora práce: Kolšov 80 78821

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PELANT, M. *Vliv řezných parametrů na mikrotvrdot povrchu při vysokých rychlostech řezání: diplomová práce.* Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 71 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Diplomová práce se zabývá vlivem řezných parametrů na mikrotvrdot povrchu při vysokých rychlostech řezání. V úvodu jsou základní poznatky, jakož jsou základní pojmy a princip řezání při vysokých rychlostech. Následně jsou popsány výhody, nevýhody a využití HSC technologie. Dále se zabývá materiály, nástroji a stroji pro tuto technologii. Další bod obsahuje vznik zpevněné vrstvy po obrábění, její měření a hodnocení. Následující část obsahuje návrh a provedení experimentální práce. Dále proběhne měření a statistické vyhodnocení dat a nakonec je provedeno zhodnocení a shrnutí přínosů pro praxi.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PELANT, M. *The effect of cutting specifications on surface micro-hardness during hiát-speed cutting: Master thehsis.* Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty Mechanical, Departmenr machining and assembly, 2011, 71 s. Thesis head: Petrů, J.

Master thesis deals with the effects of cutting specifications on surface micro-hardness during high-speed cutting. These are basic pieces of knowlege in the introduction which are basic cutting concepts and principles during highsPEEDS. These are cosequently described the advantages, disadvantages and use of HSC technology. It further deals with cutting materials, instruments and machines for this technology. Another point contains information how fixed layers arise after machining, including their measurement and evaluation. The following part contains information designing and carrying out experimental work. Further, measuring and the statistical evaluation of data are gave through. And finally, these is an evaluation and summary of the benefits this work in practice.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
ÚVOD	10
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ŘEZÁNÍ VYSOKÝMI RYCHLOSTMI	11
1.1 VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ A JEHO HISTORICKÝ VÝVOJ	11
1.2 DEFINICE POJMU HSC	11
1.3 POROVNÁNÍ ŘEZNÝCH PROCESŮ PŘI KONVENČNÍM A HSC OBRÁBĚNÍM 13	
1.3.1 ŘEZNÝ PROCES PŘI KONVENČNÍM OBRÁBĚNÍ	15
1.3.2 ŘEZNÝ PROCES PŘI HSC	16
1.4 VÝHODY A NEVÝHODY HSC	17
1.4.1 VÝHODY HSC.....	17
1.4.2 NEVÝHODY HSC.....	18
1.5 VYUŽITÍ HSC OBRÁBĚNÍ.....	19
1.5.1 TYPICKÉ POUŽITÍ TECHNOLOGIE HSC.....	19
1.5.2 SPECIFICKÉ POUŽITÍ TECHNOLOGIE HSC	19
1.5.3 PRAKTICKÉ UKÁZKY	20
1.6 ŘEZNÉ MATERIÁLY PRO HSC	22
1.6.1 ŘEZNÉ MATERIÁLY PRO OBRÁBĚNÍ OCELÍ	22
1.6.2 ŘEZNÉ MATERIÁLY PRO OBRÁBĚNÍ VYSOCE LEGOVANÝCH OCELÍ.....	23
1.6.3 ŘEZNÉ MATERIÁLY PRO OBRÁBĚNÍ SLITIN HLINÍKU	23
1.6.4 ŘEZNÉ MATERIÁLY PRO OBRÁBĚNÍ SLITIN MĚDI	24
1.6.5 ŘEZNÉ MATERIÁLY PRO OBRÁBĚNÍ LITIN	24
1.7 POŽADAVKY NA HSC OBRÁBĚCÍ STROJE A JEJICH NEJDŮLEŽITĚJŠÍ ČÁSTI.	24
1.7.1 ULOŽENÍ VŘETEN.....	25
1.7.2 UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ.....	28
2 HODNOCENÍ MIKROTVRDOTI POVRCHU PO OBROBENÍ	31
2.1 VZNIK ZPEVNĚNÉ VRSTVY.....	31
2.2 KRITÉRIA HODNOCENÍ ZPEVNĚNÍ POVRCHU A JEHO MĚŘENÍ.....	33
2.3 VLASTNOSTI OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU OVLIVŇUJÍCÍ ZPEVNĚNÍ POVRCHU.....	34
2.3.1 VLIV ŘEZNÝCH PARAMETRŮ NA ZPEVNĚNÍ POVRCHU.....	34
2.3.2 VLIV GEOMETRIE ŘEZNÉHO KLÍNU NA ZPEVNĚNÍ POVRCHU	35
2.4 MIKROTVRDOT DLE VICKERSE	35
2.4.1 PODSTATA ZKOUŠKY	36
2.4.2 PROVEDENÍ ZKOUŠKY	38

2.4.3	OZNAČENÍ TVRDOSTI	38
2.4.4	ZKUŠEBNÍ TĚLESO	39
2.5	MIKROTVRDOST DLE KNOOPA	39
2.5.1	PODSTATA ZKOUŠKY	39
2.5.2	PROVEDENÍ ZKOUŠKY	41
2.5.3	OZNAČENÍ TVRDOSTI	41
2.5.4	ZKUŠEBNÍ TĚLESO	42
2.6	ASPEKTY OVLIVŇUJÍCÍ PŘESNOST MĚŘENÍ.....	42
2.6.1	ZKUŠEBNÍ ZATÍŽENÍ	42
2.6.2	RYCHLOST VNIKAJÍCÍHO TĚLESA.....	42
2.6.3	ČAS PŮSOBENÍ ZKUŠEBNÍHO ZATÍŽENÍ	43
2.6.4	VIBRACE	43
2.6.5	POVRCH VZORKU A JEHO STAV	43
2.6.6	ORIENTACE	44
2.6.7	POLOHA VTISKU	44
3	NÁVRH A PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE.....	45
3.1	NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE	45
3.1.1	POUŽITÝ STROJ	45
3.1.2	POUŽITÉ NÁSTROJE	46
4	MĚŘENÍ A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT	59
4.1	STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ	59
4.2	PŘÍKLAD VÝPOČTU TVRDOSTI A URČENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ	61
4.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ TVRDOSTI POVRCHU MATERIÁLU	62
4.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ MIKROTVRDOSTI	63
5	ZHODNOCENÍ A SHNUTÍ PŘÍNOSŮ PRO PRAXI	66
	ZÁVĚR.....	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	71

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Apl max	maximální využitelná délka části nástroje	[mm]
CBN	kubický nitrid bóru	[-]
Cr ₃ C ₂	karbid chromu	[-]
CVD	chemical vapour deposition (chemicky nanášení povlaky)	[-]
D	průměr stopky nástroje	[mm]
D1	řezný průměr nástroje	[mm]
HBS	tvrdost podle Brinella při použití ocelové kuličky	[-]
HBW	tvrdost podle Brinella při použití kuličky z tvrdokovu	[-]
HK	tvrdost podle Knoopu	[-]
HPC	High Production Cutting (vysokoproduktivní obrábění)	[-]
HSC	High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)	[-]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
HV _{MS}	mikrotvrdost zpevněné vrstvy	[-]
HV _{MZ}	mikrotvrdost základního materiálu	[-]
L	celková délka nástroje	[mm]
LS	použitelná délka nástroje	[mm]
NbC	karbid niobu	[-]
ØD	průměr kuličky	[mm]
Ød	aritmický průměr vtisku	[mm]
PVD	physical vapour deposition (fyzikálně nanášené povlaky)	[-]
Si ₃ N ₄	nitrid křemíku	[-]
SiAlON	slitiny nitridu hliníku, oxidu a křemíku	[-]
SK	slinutý karbid	[-]
SNO	stroj – nástroj – obrobek	[-]
TaC	karbid tantalu	[-]
TiC	karbid titanu	[-]
TiCN	nitrokarbid titatu	[-]
TiN	nitrid titanu	[-]
WC	karbid wolframu	[-]
a_l	tlošťka třísky	[mm]
a_p	hloubka řezu	[mm]
F	síla řezání	[N]

f_n	posuv na otáčku	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
h	vzdálenost vpichu od povrchu mat.	[mm]
h_s	vzdálenost mezi vpichy	[mm]
n	otáčky za minutu	[min ⁻¹]
r_n	rádus špičky nástroje	[mm]
u_a	standardní nejistot typu A	[dle veličiny]
u_b	standardní nejistota typu B	[dle veličiny]
u_c	kombinovaná standardní nejistota	[dle veličiny]
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_f	rychlost posuvu	[m.min ⁻¹]
z	počet břitů frézy	[-]
α_n	úhel hřbetu	[°]
β_1	úhel stříhu	[°]
β_n	úhel břitu	[°]
γ_n	úhel čela	[°]
φ	stupeň zpevnění	[%]

ÚVOD

Za poslední dvě desítky let zaznamenala technologie obrábění mohutný rozvoj. V dnešní době, kdy zákazník požaduje mít výrobek vyroben v nekratší době a v co nejlepší kvalitě, je potřeba používat ty nejnovější, nejpreciznější a nejproduktivnější technologie. Mezi další kritéria, která jsou požadována u výrobní technologie, patří zejména snižování nákladů a také ohled na životní prostředí. Tyto kritéria bezpochyby splňuje technologie HSC (vysokorychlostní obrábění). Díky tomu, že HSC patří mezi technologie suchého obrábění a tudíž se nesmí používat procesních kapalin, se splňují velmi často kladené požadavky na ekologičnost. Zároveň se snižují náklady, které jsou jinak potřeba na zařízení spojené s přepravou a filtrací procesních kapalin. Vysokorychlostní obrábění není jen inovativní technologie, ale především strategie jak zvýšit produktivitu výroby. Tato technologie obrábění je dnes využívána v mnoha oblastech výroby. Odborníky je hodnocena za zvláště významnou. Každá technologie má své pro a proti. Tak i HSC má své záporné stránky mezi které patří vyšší pořizovací náklady, vyšší náklady na údržbu a požadavky na celkovou tuhost stroje. Ale přesto všechno se tato technologie vyplácí. Vrací vložené finance a úsilí v podobě rychlé a kvalitní produkce požadovaných výrobků.

Každý způsob opracování materiálu ať už jde o tepelné či mechanické zanechává stopu. V tomto případě jde o mechanickou stopu v podobě zpevněného materiálu, která se nachází těsně pod povrchem obrobené plochy. Řezný klín s definovanou geometrií, jenž je používán při procesu obrábění plní dvě funkce. Za prvé odřezává materiál v podobě třísky a za druhé stlačuje právě obrobenou plochu. A právě druhý bod je hlavním částí této diplomové práce.

Cílem této diplomové práce je ověření vlivu řezných parametrů vysokorychlostního obrábění na vrstvu materiálu v těsné blízkosti pod povrchem. Zda-li bude vrstva materiálu v těsné blízkosti povrchu mechanicky ovlivněna do jaké hloubky a jak se změní velikost tvrdosti ovlivněné vrstvy. Aby byl zjištěn rozsah a velikost mechanického zpevnění, byla provedena měření mikrotvrdosti. Měření mikrotvrdosti bylo provedeno v laboratoři metalografie na VŠB-TU Ostrava.

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY ŘEZÁNÍ VYSOKÝMI RYCHLOSTMI

1.1 Vysokorychlostní obrábění a jeho historický vývoj

S obráběním vysokými rychlostmi začal experimentovat v letech 1924 až 1931 pan Dr. Carl J. Salomon. Experiment v posledním roce vyústil v německý patent, který popisoval křivky popisující závislost teploty na řezné rychlosti. Pro experiment si vybral neželezné kovy, jako je měď a hliník a dosáhl rychlostí až $16\,500\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Předpokládal, že řezná teplota bude dosahovat maxima při určité řezné rychlosti a při jejím dalším zvyšování začne teplota klesat. Domníval se, že se primární plastická deformace v závislosti na řezné rychlosti zmenšuje, protože stupeň plasticity je závislý na rychlosti deformace. Proto čím větší je řezná rychlost tím méně je materiál plastický.

Po Salomonovi se tomuto výzkumu ještě věnovali vědci v USA. A po dalších experimentech bylo zjištěno, že rychlý nárůst teploty na začátku řezání se zpomalí a střední teplota řezání se zvyšuje se zvyšující se řeznou rychlostí a blíží se asymptoticky k teplotě tavení obráběného materiálu. [1]

1.2 Definice pojmu HSC

Vysokorychlostní obrábění je vysoce výkonné obrábění, při kterém se odebírá velké množství materiálu za jednotku času tzv. úběr. Nelze přesně určit, kdy přechází konvenční obrábění do vysokorychlostního. Tento přechod není závislý jen na řezné rychlosti, ale také na ostatních podmínkách vytvářející řezný proces. Myslíme tím způsob obrábění a druh obráběného materiálu, který je hlavním určujícím faktorem při volbě řezné rychlosti.

Řezná rychlost, při které lze daný materiál obrábět tak, aby byla dosažena přijatelná trvanlivost břitu, může být velmi rozdílná. Řezná rychlost výrazně ovlivňuje, zda obráběný

materiál bude tvořit plynulou nebo článkovitou třísku. Vysokorychlostní obrábění není jen inovativní technologie, ale především strategie zvýšení produktivity výroby. Aplikace této metody je vždy iniciována snahou o snížení nákladů a zvýšení objemu výroby při současném dodržení kvality. Velmi hladký povrch a velký objem odebraného materiálu za časovou jednotku jsou hlavní přínosy použití této metody. HSC technologie není jen samostatné vysokorychlostní obrábění, řadí se k tomu i tzv. *tvrdé* a *suché* obrábění. [2],[3]

Technologie tvrdého obrábění je motivována snahou nahradit dokončovací broušení kalených a tvrdých materiálů obráběním s geometricky definovaným řezným klínem. Jedná se o soustružení, frézování, vrtání a vyvrtávání. Při porovnání s klasickým broušením má tato technologie přednosti jako je:

- ❖ vyšší úběr materiálu oproti broušení;
- ❖ rozptyl tepla je omezený jen na špičku nástroje, a tím se sníží teplotní ovlivnění plochy obrobeneho materiálu;
- ❖ tato technologie se vyznačuje vysokou flexibilitou, zejména při obrábění rotačních tvarových ploch;
- ❖ další výhodou je významné snížení kusového času a zkrácení průběžné doby výroby;
- ❖ tato metoda se obejde bez řezných kapalin, což vede ke zvýšení ekologizaci výroby.

Kromě již zmíněných předností má tato technologie i pár nedostatků, jako jsou například:

- ❖ drsnost povrchu materiálu je ovlivněna posuvem na otáčku a řeznou rychlostí;
- ❖ jelikož je řezný klín zatížen vysokou měrnou silou, vzniká nebezpečí poškození hrotu nástroje.

Převládající výhody technologie tvrdého obrábění oproti broušení přimělo vyspělé státy (USA, Německo, Japonsko, Velká Británie) k velkému nárůstu výzkumných projektů, zabývajících se touto tematikou.

Technologie suchého obrábění je tlačena snahou snižováním nákladů na nákup, skladování, filtraci, recyklaci a likvidaci odpadu procesních kapalin. Náklady na obráběcí

nástroje potřebné pro výrobu určité součásti tvoří 4 – 5 %, zatímco náklady na procesní kapalinu její filtraci, likvidaci (recyklaci) tvoří 15 – 20 % z celkových nákladů.

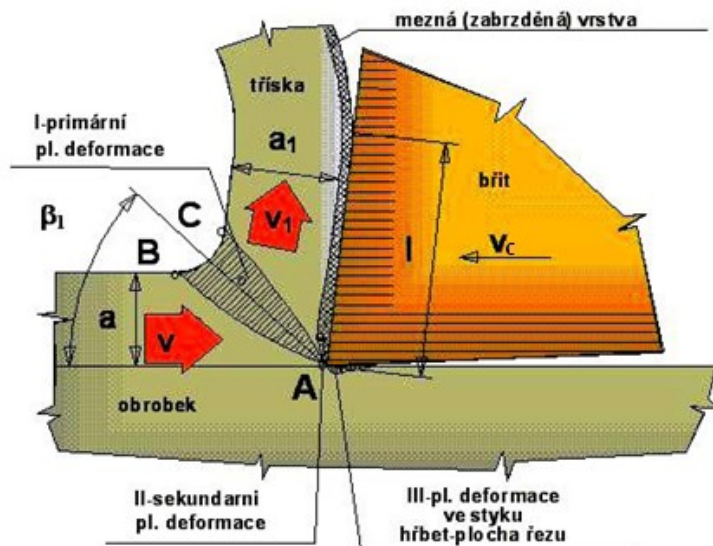
A proto se dnes snažíme eliminovat použití procesních kapalin z vlastního řezného procesu. Tím, že bude obrábění probíhat za sucha, se zjednoduší i obráběcí centrum. Odpadá nutná údržba nádrží a rozvodů procesních kapalin. Další důvod, proč tuto technologii podporovat a dál rozvíjet, je ohled na zdraví jednotlivých pracovníků, kteří přijdou s těmito kapalinami do styku, a samozřejmě ohled na životní prostředí.

Ale existují i případy, při kterých je používání procesních kapalin nutné, zejména při frézování hlubokých drážek. Při dokončovacích pracích zabraňuje procesní kapalina zadírání drobných částeczek do obrobeného povrchu tím, že je odplavuje z místa řezu. Dále se procesní kapalina využívá u obrábění tenkostěnných součástí za účelem snížení geometrické deformace. [4],[5]

Další pojem, který se často objevuje v souvislosti s touto tematikou je zkratka HPC (vysoce-výkonné obrábění). Tyto dva pojmy (HSC a HPC) se chybně považují za shodné, což však není pravda, i když cílem těchto metod je v podstatě to samé (dosažení co největšího řezného výkonu). Rozdíl je v prvcích samostatného procesu obrábění. Hlavní kritérium HSC je řezná rychlost, zatím co u HPC jde především o ekonomicko-kvalitní hledisko. [1]

1.3 Porovnání řezných procesů při konvenčním a HSC obrábění

Efektivní řezání kovu nastává pouze tehdy, když si řezný materiál při teplotě a prostředí řezného procesu udrží výraznou převahu tvrdosti (o několik stupňů vyšší) oproti obráběnému materiálu. [2]



Obr. 1 Oblasti plastické deformace [1]

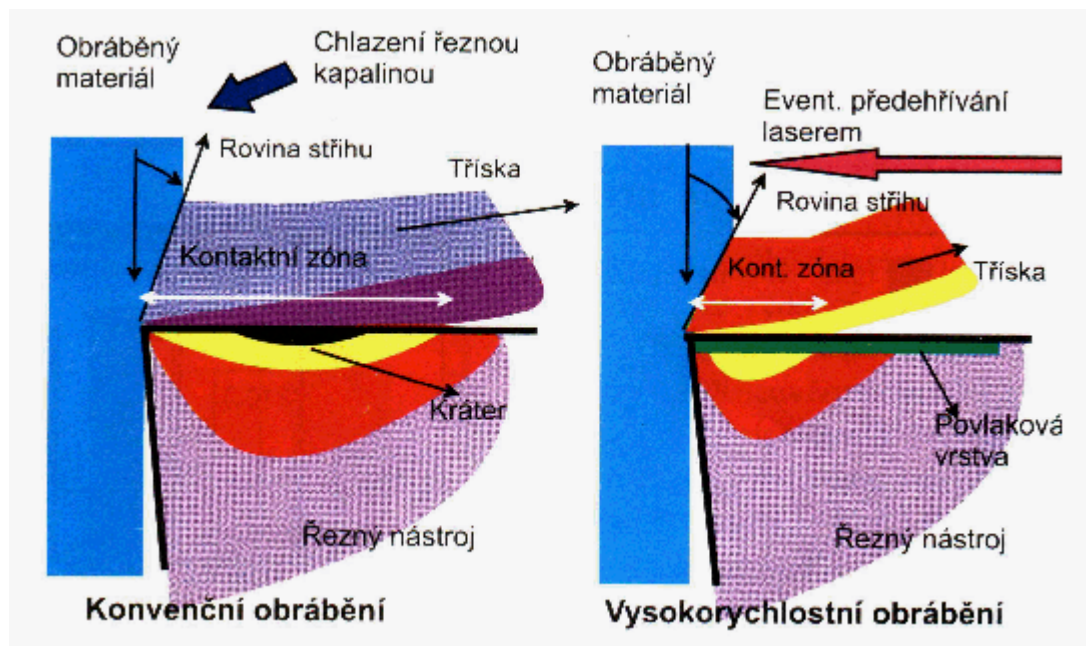
pl. = plastická

oblast primární pl. def. BCA

v_c ... řezná rychlost

Při procesu obrábění se břit nástroje pohybuje proti pohybu obrobku řeznou rychlostí v_c a proti směru působení řezné síly F , to způsobí vznik (odříznutí) z obrobku určitou vrstvu o tloušťce a_p . V místě před břitem nástroje dochází k deformacím, které způsobují přeměnu odřezané vrstvy materiálu v třísku. V tomto místě jde především o **primární plastickou deformaci** a ta působí po celém průřezu odřezávané vrstvy, což lze vidět na obr. 1. Další oblast, kde dochází k plastické deformaci, je oblast třísky v blízkosti plochy, kde se dotýká třísky s čelem břitu a následkem tření vzniká velké množství tepla. Tato deformace se nazývá **sekundární plastická deformace**. Na proces řezání mají tyto dvě oblasti plastické deformace velký vliv, a proto je důležité, abychom se zaměřili právě na tato místa při porovnávání konvenčního obrábění s HSC metodou.

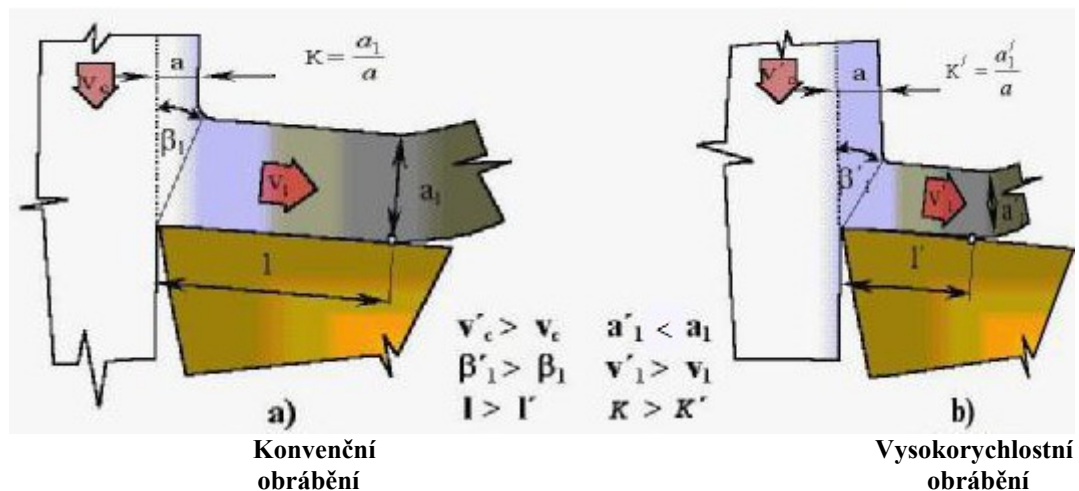
Celková teplota řezného procesu roste se vzrůstající řeznou rychlostí, ale také s narůstající intenzitou tření třísky o břit. Teplota třísky se skokově mění při působení plastické deformace v rovině smyku třísky a dále roste třením třísky o čelo břitu. Rozdíly v řezných procesech mezi konvenčním obráběním a technologií HSC lze vidět na obr. 2.[1]



Obr. 2 Porovnání konvenčního a vysokorychlostního obrábění [1]

1.3.1 Řezný proces při konvenčním obrábění

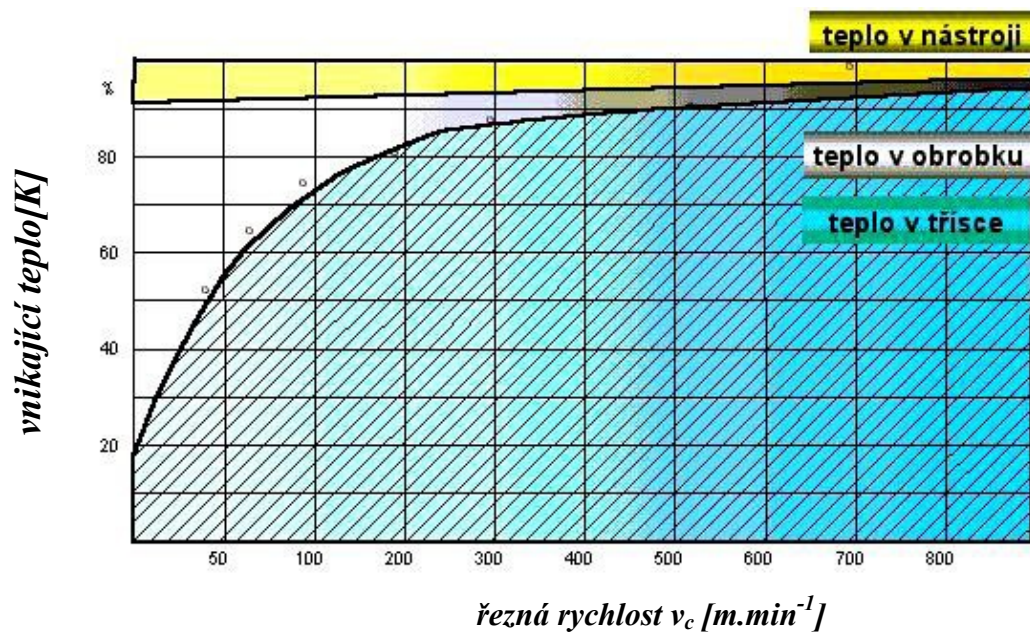
Při aplikaci konvenční metody obrábění prochází odřezaný materiál (tříska) oblastí primární plastické deformace a zde se deformuje, což vede ke zpevnění třísky. V tomto okamžiku má materiál třísky větší tvrdost oproti původnímu obráběnému materiálu. Takto zpevněné třísky mohou mít tvrdost až 1,5 krát větší než základní materiál a následkem toho je, že kladou větší řezný odpor. Velký řezný odpor vyvolaný zpevněnou třískou má za následek zvětšující se průřez třísky, odpor proti ohybu a současně i plochu kontaktní zóny. Mezi čelem a třískou současně působí třecí a přitlačné síly, jejichž velikost dosahuje vysokých hodnot. Velké množství tepla vyvolaného třením přechází z třísky do břitu nástroje. Velká přitlačná síla a třecí teplo podporují procesy, při kterých dochází k intenzivnějšímu opotřebení čela nástroje, kde jsou vymílány krátery. Jedná se o difuzní a abrazivní procesy. Se zvyšováním rychlosti smyku třísky ve smykové rovině a řezným odporem závislým na obráběném materiálu se zvyšuje celková intenzita procesního tepla. Za těchto podmínek se tvrdé a kalené materiály nedají (anebo jen velmi obtížně) obrábět. Řezná rychlost u konvenčních nástrojů a běžných materiálů je omezena prudkým nadměrným opotřebením a tím velmi rychlým poklesem řezivosti. [1],[6]



Obr. 3 Porovnání místa řezu u konvenčního a HSC obrábění [1]

1.3.2 Řezný proces při HSC

Při působení velké rychlosti při vysokorychlostním obrábění dochází k podstatně odlišným procesům než u konvenčního obrábění. (viz obr. 3) Vysokorychlostní obrábění probíhá v podmínkách, kdy se teplota třísky přibližuje teplotě tavení obráběného materiálu. Během procesu obrábění dojde k náhlé změně řady mechanických a metalurgických vlastností třísky. Těchto změn se dosáhne při určité řezné rychlosti. Tříska zčervená, změkne a tím se sníží přítlačná síla na čelo nástroje. Tento děj nastane i v případě obrábění kalené oceli. Klesne třecí síla i celkový řezný odpor, ztenčí se průřez třísky, zvětší se úhel smykové roviny, zvýší se rychlost odchodu třísky z kontaktní zóny, sníží se plocha kontaktní zóny a tím se omezí sekundární nárůst teploty třísky třením mezi čelem a třískou. I přes celkový významný nárůst teploty se minimalizuje přenos tepla do obrobku a břitu nástroje a značně se omezí působení difuzních a abrazivních procesů. Používaná vysoká kvalita řezné hrany u nástrojů „HSC“ a jejich povlaky zvyšují odolnost proti abrazivnímu a difuznímu opotřebení. Použitý povlak má nejen schopnosti zmírnit abrazivní a adhezivní procesy, ale má i funkci tepelně izolační, což snižuje přestup tepla do břitu nástroje. Při určité řezné rychlosti se růst teploty třísky zpomaluje a teplota dosahuje svého maxima.



Obr. 4 Rozdělení vzniklého tepla při obrábění oceli v závislosti na řezné rychlosti [1]

Při obrábění hliníku se teplota v místě řezu pohybuje okolo 600 °C, u bronzu 1000 °C, u šedé litiny 1300 °C a u oceli 1500 °C. Chlazení nástroje procesní kapalinou není v tomto případě přípustné z důvodů nedosažení vysokorychlostního režimu, a také vzhledem k tomu, že používané řezné materiály jsou citlivé na tepelné šoky. [1],[6]

1.4 Výhody a nevýhody HSC

1.4.1 Výhody HSC

- Větší objem odebraného materiálu za jednotku času. Množství odebraného materiálu je zhruba o 30 % větší, než u konvenčního obrábění.
- Snížení řezných sil, které jsou ovlivněny vyšší teplotou třísky.
- Zvýšením otáček vřetena je umožněno zvýšit posuv, při zachování stejné tloušťky třísky, a tím se docílí snížení strojního času.
- Podíl tepla odváděného třískou je větší než u konvenčního obrábění. Řezná rychlost má vliv na rozložení odvodu tepla (u HSC technologie: 75 % třískou, 10 % břitem nástroje, 10 % okolním prostředím a 5 % obrobkem.)
- Tím, že se sníží podíl tepla odvedeného obrobkem, se sníží i jeho tepelná deformace.

- Čím vyšší je posuvová rychlost, tím kratší je doba na tepelné ovlivnění obrobku.
- Zvyšuje se rozměrová přesnost obrobku.
- Zvýšením kvality obrobeného povrchu odpadají dokončovací práce.
- Největší produktivita je ve fázi dokončování, protože je zde dosahováno výborné kvality povrchu.
- Možnost obrábění velmi tenkých obrobků.

1.4.2 Nevýhody HSC

- Nákladné strojní vybavení.
- Speciální a tudíž drahé řezné materiály a nástroje.
- Vyvažování rotačních součástí je nutností.
- Speciální upínání obrobků.
- Upínání řezných nástrojů, které musí být speciální a přesné.
- Nutnost odstraňování velkého objemu třísek za jednotku času.
- Větší otupení břitů.
- Zvýšení nákladů na zajištění bezpečnosti obsluhujícího personálu.
- Hospodárné práce a kvalitního povrchu lze při dokončování dosáhnout, pouze při malých odebíraných objemech.
- Prudké zrychlení a zpomalení vřetene způsobuje rychlejší opotřebení ložisek, vedení a uložení. A to vede k nárůstu nákladů na opravy a údržbu.
- Obsluhující personál musí mít vysoké odborné znalosti o této technologii.
- Fáze testování vyžaduje delší čas.
- Plánování výroby a optimalizace řezného procesu musí být na vysoké úrovni vzhledem k nákladnému zařízení a nářadí. (plně hospodárně využít stroje a nářadí).

[2],[7]

1.5 Využití HSC obrábění

1.5.1 Typické použití technologie HSC

a) Obrábění, kde hrubování tvoří vysoký podíl celého procesu při použití výkonných vřeten. Příkladem může být výroba dílů pro letecký průmysl, nebo zvláště sériová výroba v automobilovém průmyslu. Touto metodou se vyrábí např. hlavy válců, pumpy, skříně převodovek, díly brzd atd. V těchto oblastech se převážně jedná o materiál ze slitin hliníku.

b) Součásti s tenkými stěnami náchylnými na deformaci a součásti z křehkých materiálů. Tyto součásti nelze obrábět konvenčními metodami. Při použití technologie HSC vznikají pouze malé síly, které působí na obrobek a tím i malé riziko deformace obrobku.

c) Obrábění součástí z materiálů, které jsou citlivé na teplo vznikající při řezném procesu. Tato technologie je vhodná, protože při procesu obrábění je přechod tepla do obrobku velmi malý.

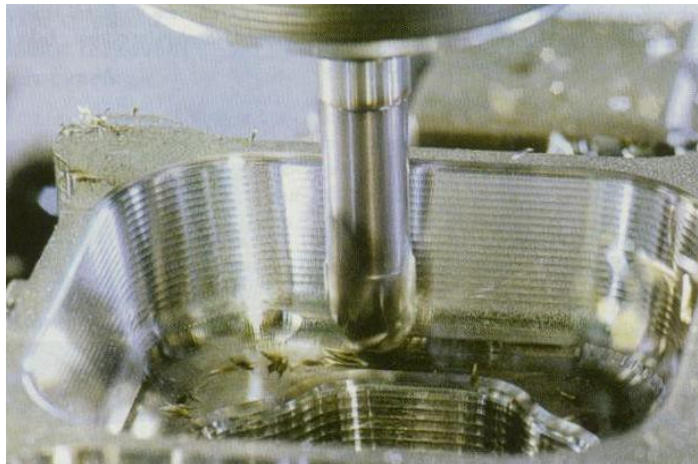
d) Výroba forem, zápusťek, lisovacích nástrojů a elektrod. Přínosem je kromě zkrácení času výroby zlepšení přesnosti a kvality povrchu. Odpadáva nutnost následného ručního dokončování povrchu formy. Pro výrobu těchto částí se používá měď, ocel a kalená ocel.

1.5.2 Specifické použití technologie HSC

HSC technologie se nasazuje v oblasti výroby zápusťek a forem, a to z několika důvodů. Jedním z nich je zvýšená integrita povrchu, přesnost a dokonalé odfrézování požadovaného materiálu. Toto má za důsledek snížení, někdy i úplné odstranění dokončovací fáze opracování, jako jsou leštění, ruční dokončování a elektrojiskrové obrábění. To znamená, že k výrobě celého obrobku bude zapotřebí jen několika málo nástrojů. Další důvod, proč nasazovat tuto technologii, je zkrácení průběžných časů výroby a tím snížení finanční náročnosti celého procesu. Během obrábění zápusťek a forem se stále objevují překážky, mezi které v první řadě patří vysoká intenzita opotřebení břitů způsobená vysokými teplotami při obrábění. To je zapříčiněno také vysokými

mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu. Pro nasazení HSC technologie jsou také nutné vysoké nároky na obráběcí stroj, nástroj a na řezné podmínky. [1]

Další specifické využití HSC technologie je při výrobě lopatek kol pro různé typy turbínových soustav, které se vyrábí z velmi pevných a odolných slitin titanu, používané především v leteckém a energetickém průmyslu. Vyznačují se velkou pevností a únavovou pevností při nízké hmotnosti. Dnes se touto metodou vyrábí lopatková kola z jednoho kusu. Nikoli jak dříve, že se vyrobil střed, do kterého se pak nasazovaly samostatně vyrobené lopatky. Toto ale s sebou přináší vyšší nároky na vlastní obráběcí proces, protože množství odstraněného materiálu vzroste až o 90 %. Právě takovéto speciální operace lze vyrobit touto nekonvenční HSC technologií. [2]



Obr. 5 Příklad frézování formy [1]

1.5.3 Praktické ukázky



Obr. 6 HSC frézování [2]

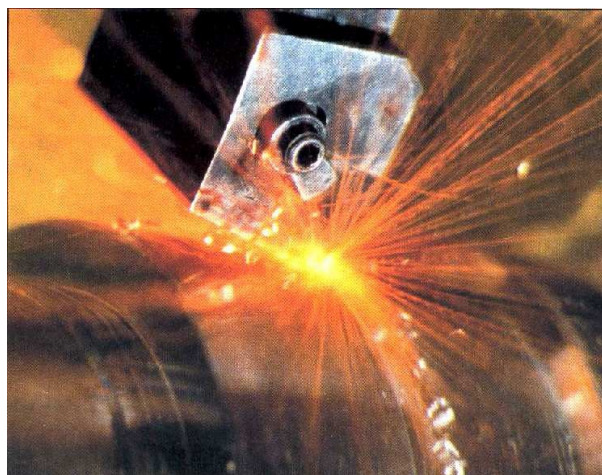
Na obr. 6 lze vidět, jak vypadá proces vysokorychlostního frézování karbidovými nástroji s povlaky TiAlN-X. S nástroji tohoto typu je možné obrábět kalené a pevné oceli, vysocelegované a oceli chromové i niklové.

Mezi důležité oblasti HSC technologie také patří dokončovací a hrubovací soustružení všech materiálů. Na Obr. 7 lze vidět vysoce přesné dokončovací soustružení mosazných povrchů válečků za použití polykrystalického diamantu. Drsnost obrobeného povrchu je v tomto případě 0,05 μm . [1]



Obr. 7 HSC soustružení [2]

Obr. 8 ukazuje soustružení, na kterém je dobře patrné soustředění vysoké teploty materiálu v místě řezu.



Obr. 8 Detail HSC soustružení [2]

1.6 Řezné materiály pro HSC

Materiál řezného nástroje je klíčovým prvkem, který umožňuje použití technologie HSC. Aby se zabránilo náhlému lomu břitu nástroje způsobeného tepelnými a mechanickými šoky a snížil se vliv opotřebení, musí mít použité materiály řezných nástrojů vysokou tvrdost povrchu, vysokou houževnatost a vysokou odolnost proti chemickému působení. Tyto vlastnosti musí být zachovány po celou dobu řezného procesu, kdy zde vznikají vysoké pracovní teploty. Je nutné tedy znát tvrdost počáteční, ale i to jak se tvrdost mění s teplotou v místě řezu. V dnešní době se pro obrábění oceli hojně využívají povlakované karbidy a cermety, pro obrábění litiny se využívá řezné keramiky, a na neželezné materiály jsou vhodné diamanty a kubický nitrid bóru je vhodný pro obrábění velmi tvrdých materiálů, jako jsou litiny a kalené oceli. I když je diamant nejtvrdší materiál na světě, není vhodný na obrábění železných materiálů. Důvodem je ztráta tvrdosti diamantu při dosažení teploty cca 700 °C. [1],[2]

1.6.1 Řezné materiály pro obrábění ocelí

V dnešní době se pro obrábění ocelí využívá slinutých karbidů a cermetů. Tyto materiály se nevyznačují takovou tvrdostí při vysokých teplotách jako řezná keramika či CBN, ale za to mají vyšší houževnatost. Základními karbidy pro výrobu všech běžných *slinutých karbidů* pro obrábění ocelí jsou karbidy wolframu (WC), karbid titanu (TiC) a jako pojivo tu plní funkci kobalt (Co). Další prvky pro zlepšení tvrdosti a pevnosti jsou karbidy niobu (NbC), tantalu (TaC) a chromu (Cr₃C₂). Dále se pro zlepšení tvrdosti SK povlakuje zejména nitridem titanu TiN, karbidem titanu TiC, oxidem hlinitým Al₂O₃ a nitrokarbidem titanu TiCN. Povlakované slinuté karbidy se vyznačují dobrou houževnatostí, ale za to menší tvrdostí a pevností oproti cermetům. Jsou vhodné pro obrábění středními a vyššími řeznými rychlostmi při proměnlivé hloubce a přerušovaném řezu. **Cermety** jsou materiály obsahující částice TiC, TiN a TiCN (60 až 85 %) a zbytek obsahuje kovové pojivo (Ni, Mo, Co). Cermety se vyrábí obdobně jako slinuté karbidy práškovou metalurgií. Vyznačují se velmi dobrou tvrdostí za tepla, chemickou stabilitou, dobrou odolností proti opotřebení čela a hřbetu. Oproti SK vykazují menší odolnost proti tepelnému rázu a menší houževnatost.

Další výhody cermetu jsou malá náchylnost k oxidačnímu opotřebení, lepší jakost obrobené plochy, velká trvanlivost bříty a vysoká přesnost rozměrů obrobku. Proto jsou tyto materiály vhodné pro obrábění vysokými rychlostmi.

1.6.2 Řezné materiály pro obrábění vysoce legovaných ocelí

Pro obrábění oceli nejvyšší tvrdosti a pevnost je používán kubický nitrid bóru (CBN), vzhledem k jeho vysoké tvrdosti a schopnosti si ji udržet až do teplot 2000 °C. Mezi další výhody patří výborná odolnost proti opotřebení a chemická stabilita k železným kovům. Pro obrábění méně tvrdých legovaných ocelí se doporučuje řezná keramika. Jsou to materiály na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) nebo slitiny Si_3N_4 a Al_2O_3 označovaná jako SiALON, které jsou vhodné především pro dokončovací operace. Pro hrubování je vhodná oxidická keramika vyznačující se odolností proti tepelným rázům a vysokou odolností proti opotřebení.

1.6.3 Řezné materiály pro obrábění slitin hliníku

Teplota řezání je u hliníkových slitin omezena nízkou teplotou tavení (600-660 °C) a vysoko tepelnou vodivostí hliníku. Pro obrábění hliníkových slitin se hojně využívá polykrystalický diamant, zejména pro obrábění vysoce tvrdých materiálů (Al slitin, 10-20 % Si). Vedle vysoké tvrdosti danou vazbou kubické mřížky má diamant velmi dobrou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, dobrou tepelnou vodivost a nízký koeficient tření. Tepelná vodivost diamantu je větší než u hliníku, a proto diamantový nástroj při obrábění přejímá vzniklé teplo rychleji než ostatní řezné materiály. Vysoká tepelná vodivost zamezuje přehřátí, proto je pro životnost nástroje velmi výhodná. Mezi nevýhody patří křehkost, afinita k niklovým slitinám, železným kovům a nízká řezná teplota. Polykrystalický diamant při teplotě 700 °C změní svoji kubickou strukturu na hexagonální strukturu grafitu, a tím pádem prudce klesne jeho tvrdost. Jelikož se při obrábění hliníku tak vysokých teplot nedosahuje, je možné ho bez obav použít.

1.6.4 Řezné materiály pro obrábění slitin mědi

Pro obrábění slitin hliníku je vhodný jak SK, tak i polykrystalický diamant. Ale například některé typy keramiky zejména směsná a bezoxidická nejsou vhodné pro obrábění takovýchto materiálů z důvodu jejich velké náchylnosti k adhezi. Rychlořezná ocel zase například nedosahuje dostatečné trvanlivosti břitu. A při obrábění těžkoobrobitelných slitin mědi má také tendenci k adhezi. Ze všech používaných řezným materiálů na obrábění slitin mědi je nejvhodnější diamant, protože se vyznačuje lepší otěruvzdorností, vyšší dosahovanou kvalitou povrchu a nižšími řeznými silami.

1.6.5 Řezné materiály pro obrábění litin

Při obrábění litiny metodou HSC do rychlosti kolem $1250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ jsou vhodné cermety, ale při vyšších rychlostech se používá Si_3N_4 a CBN. Při použití řezné keramiky pro obrábění litiny bylo dosaženo dobré trvanlivosti břitu z důvodu vysoké tepelné stability. Pro obrábění velmi tvrdých litin je nejvhodnější polykrystalický CBN. [1],[8],[9]

1.7 Požadavky na HSC obráběcí stroje a jejich nejdůležitější části.

Nástup HSC obráběcích strojů přináší s sebou i nové nároky na jejich konstrukci. Nové stroje mají několikanásobně vyšší instalovaný výkon a současně i značně širší možnosti ve výrobním nasazení. Vysokorychlostní obrábění vyžaduje celkovou tuhost soustavy S-N-O (Stroj-Nástroj-Obrobek). Splnění požadovaným podmínek u HSC strojů je řešení rámu, které musí být lehké a tuhé s dobrým útlumem mechanických šoků a vibrací. Součástí rámu jsou také přímočará vedení, popřípadě otočná uložení, u kterých je také požadavek na vysokou tuhost a minimální tření při vysokých rychlostech posuvu. Při HSC obrábění narůstá celkové teplo, jehož převážná část odchází třískou, z tohoto důvodu musí být zajištěno rychlé odstranění třísek z pracovního prostoru stroje.

Jednou z nejdůležitějších částí stroje je vřeteno, na které jsou kladeny vysoké požadavky, co se týče počtu otáček za minutu a velikosti krouticího momentu v oblasti nižších otáček. Vřetena pro HSC obráběcí stroje jsou konstruována tak, že mají vřeteno

přímo spojeno s elektromotorem, tudíž bez mechanických převodů. U HSC obráběcích strojů se nebavíme jen o vysoké řezné rychlosti, ale také o veliké posuvové rychlosti. Konvenční vřetena obráběcích strojů s pohony extrémních výkonů, spojkami a mechanickými převodovkami nejsou schopné dosáhnout požadovaného výkonu, torzní tuhosti, tlumení vibrací a geometrické přesnosti požadované HSC technologií. HSC stroje jsou vybaveny integrovanými vřeteny, které musí být předeprnuta v axiálním a radiálním směru a pracovat bez vůle s dobrou tuhostí a účinností v celém rozsahu otáček a pracovních teplot. Integrovaná vřetena jsou přímé rotační pohony, které nemohou využít výhod, jako mají mechanické převodovky s proměnným převodem. Jedná se o zajištění konstantního výkonu v celém pracovním rozsahu otáček a vysokých momentů při nejnižších otáčkách. Toto samozřejmě vyžaduje speciální uložení vřeten, která jsou schopna dlouhodobě přenášet velmi vysoké rychlosti. [1],[10]

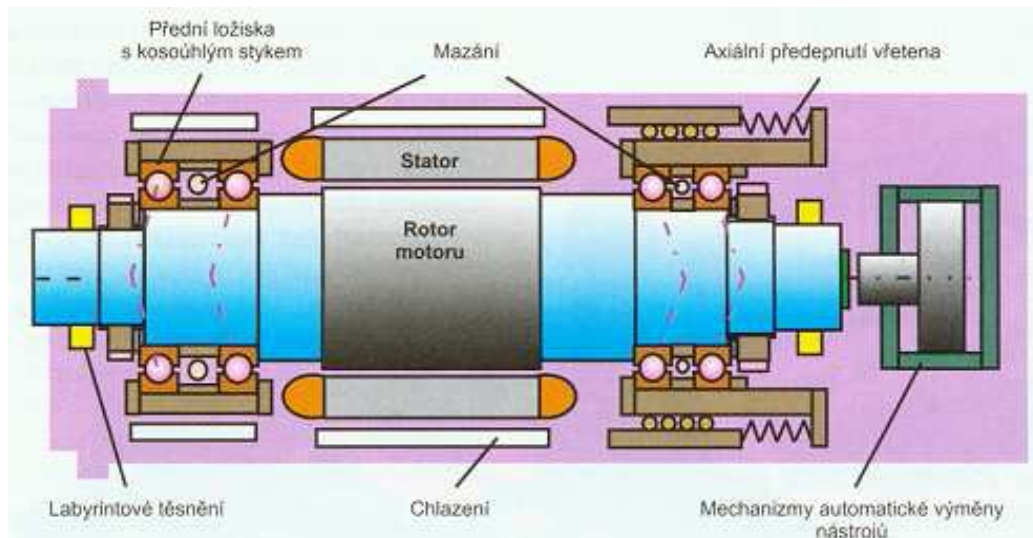
1.7.1 Uložení vřeten

Na uložení vřeten jsou kladeny požadavky, mezi které patří:

- Vysoká tuhost.
- Malý součinitel tření.
- Nízké opotřebení (vysoká životnost).
- Přesnost.
- Spolehlivost.
- Jednoduchá údržba.

Vřetena s valivým uložením

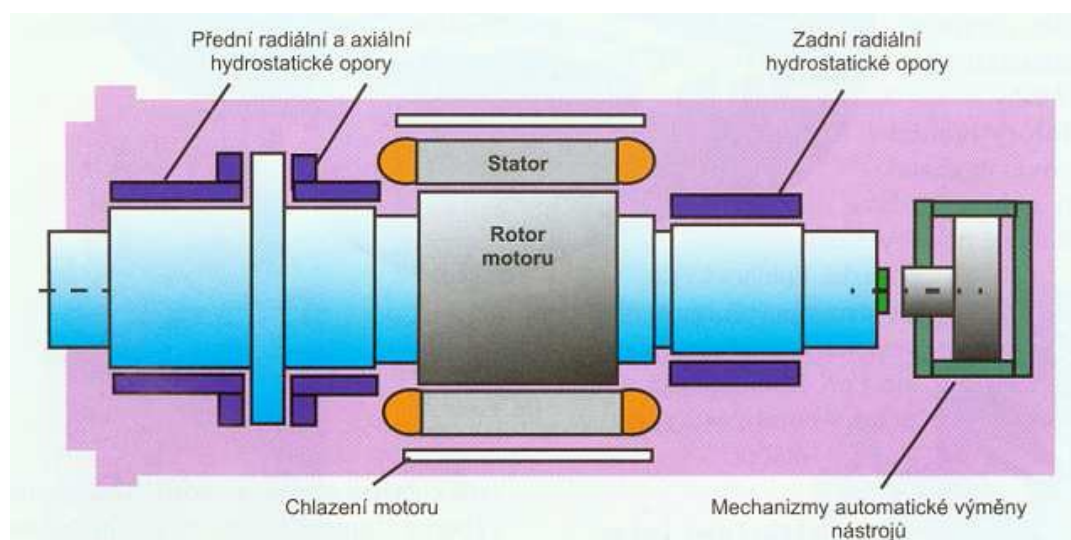
Vřetena s valivým uložením bývají vybavena ložisky s kosoúhlým stykem. Tento typ patří dnes mezi nejpoužívanější pro HSC soustružení a frézování. Ve všech HSC aplikacích se používají kuličky keramické, protože oproti ocelovým mají dvojnásobnou tvrdost a o 40 % menší hmotnost. Ložiska vybavena těmito kuličkami se nazývají „hybridní“ a vyznačují se menšími odstředivými silami, mnohem delší životností a také vyšší tepelnou odolností. Na obr. 9 lze vidět schéma konstrukčního řešení integrovaného vřetena s valivým uložením. [10],[11]



Obr. 9 Schéma konstrukčního řešení integrovaného vřetena s valivým uložením [11]

Vřeteno s hydrostatickým uložením

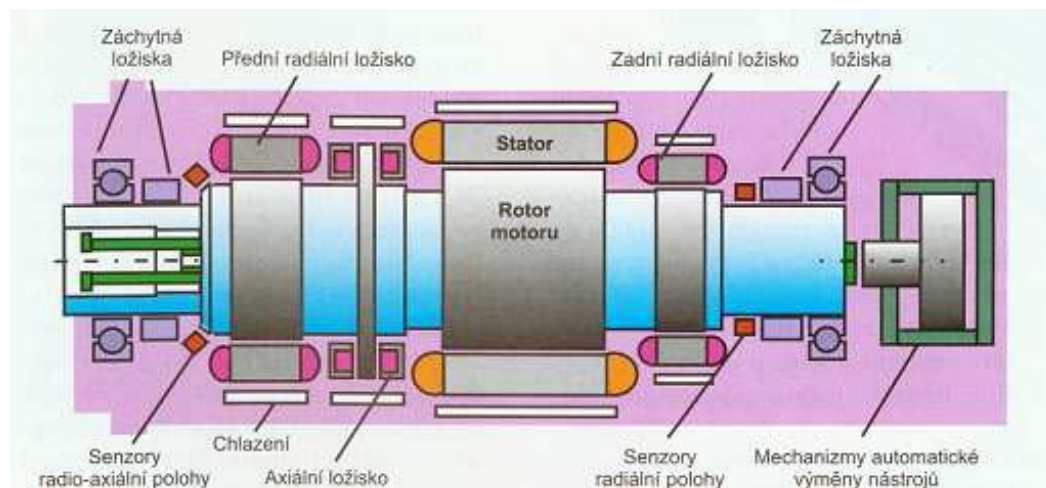
U vřeten s hydrostatickým uložením se využívá nízkoviskózního oleje jako radiální a axiální opory pro uložení vřetene. Dále plní funkci mazání, chlazení, přehřívání a tepelné stabilizace, což také vede k relativně jednoduchému konstrukčnímu řešení vřetena. Nutností nezávislého chlazení motoru zůstává u velkých hydrostatických vřeten. Vřeteno s tímto typem uložení má výborné tlumení, velmi vysokou tuhost, přesnost a je vhodné i pro nejvyšší vnější síly. Třecí moment je v klidu nulový, ale s rostoucími otáčkami se zvětšuje, což znesnadňuje použití otáček nad 25000 min^{-1} .



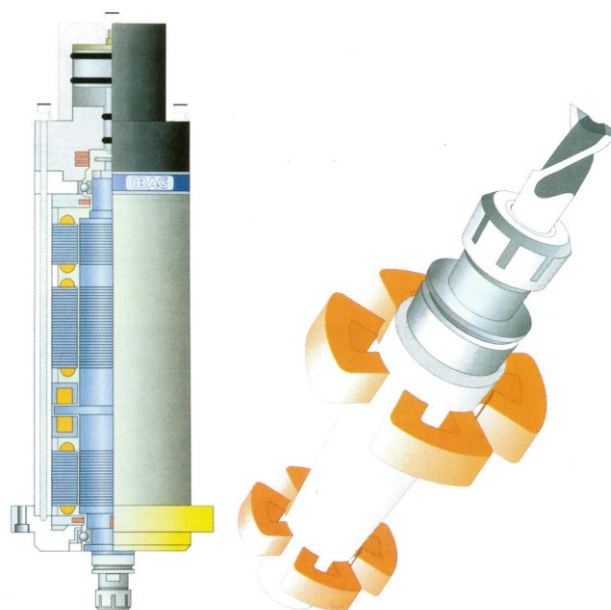
Obr. 10 Princip vřetena s hydrostatickým uložením [11]

Vřeteno s magnetickým uložením

Vřetena s magnetickým uložením pracují na principu monitorování radiální a axiální odchylky pomocí senzorů, které pak řídí proud v cívkách radiálních a axiálních elektromagnetických ložisek. U tohoto typu uložení vřetene je nutné intenzivní vnější chlazení magnetických ložisek i motoru. Velkou výhodou je, že u těchto vřeten odpadá potřeba mazání, z důvodu nulového tření v celém rozsahu otáček, a proto mohou být použita pro frézování i broušení až do otáček $200\,000\text{ min}^{-1}$. Vřetena však jsou vybavena pomocnými mechanickými ložisky s dostatečnou vůlí, která chrání magnetická ložiska před zničením v případě výpadku energie.



Obr. 11 Schematicky znázorněné vřeteno s magnetickým uložením



Obr. 12 Schematický řez magnetickým vřetenem a prostorové postavení dvou čtveřic radiálních ložiskových elektromagnetů [11]

1.7.2 Upnutí nástrojů

Při vysokých rychlostech obrábění jako je dosaženo u HSC technologií je požadavkem a zároveň nutností kvalitně upnout obráběcí nástroj. Každý upínač se musí vyznačovat dobrou tuhostí a minimální obvodovou házivostí. V tomto případě to platí dvojnásob, jelikož rychlosti jsou u HSC jsou mnohokrát vyšší než u konvenčních obráběcích strojů. Mezi nejpoužívanější upínací systémy pro HSC obrábění patří hydromechanické upínače. Tento systém upínání využívá vlastností kapalin. Samotná kapalina neplní upínací funkci, ale slouží k přenášení upínací síly. Tento systém upínání je složitější z hlediska použití kapaliny. Jsou zde vysoké požadavky na těsnost, což se samozřejmě projevuje na pořizovacích nákladech upínače, které jsou vyšší než u jiných typů. Hydraulické upínače se vyznačují velmi nízkou obvodovou házivostí a to v hodnotách 0,002 – 0,005 mm. Jelikož hydromechanický systém využívá kapalinu, tak jsou tyto upínače schopny tlumit vibrace při obrábění.

Upínače Tendo

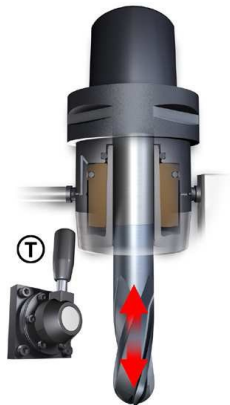
Tento typ upínače pracuje na základě deformace rozpínacího pouzdra, které je uloženo v základním těle upínače. Otáčením upínacího šroubu se vytvoří tlak kapaliny uvnitř upínače a ten zdeformuje pouzdro (zmenší průměr), ve kterém je vložena stopka nástroje a tím nástroj upne. Rozpínací pouzdro je vybaveno spirálovými drážkami, díky kterým jsou odváděny nečistoty a zbytky oleje, což zvyšuje pevnost a spolehlivost upnutí. Upínače Tendo zaručují obvodové házení nástroje $\leq 0,003$ mm. [12],[13]



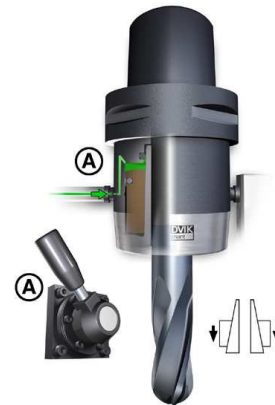
Obr. 13 Řez hydraulickým upínačem typu Tendo [12]

Upínače CoroGrip

Tento typ upínačů využívá kapalinu k posunutí „upínacích čelistí“, které následně zadrží stopku nástroje uvnitř upínače. Aby upínací mechanismus nebyl pod tlakem po celou dobu, tak se po zasunutí „upínacích čelistí“ kapalina vypustí. Tlak kapaliny zde není potřeba, protože nástroj drží díky samosvornosti čelistí. Princip systému CoroGrip lze vidět na obr. 14. [12]



Páka ventilu v poloze T umožňuje vložení a vyjmutí nástroje



Páka ventilu v poloze A otvírá přístup kapaliny do upínače pro upnutí nástroje.



Páka ventilu v poloze T při upnutí nástroje



Páka ventilu v poloze B otvírá přístup kapaliny pro uvolnění nástroje

Obr. 14 Upínací systém CoroGrip [12]

Stále větší oblibu a uplatnění nachází ve strojírenství také tepelné upínání nástrojů. Díky svým výhodám je tento systém upínání nástrojů velmi vhodný právě pro vysokorychlostní obrábění. Mezi jeho výhody patří přesnost, rychlost, tuhost upnutí a výrazné snížení nákladů.

Dutina pro upnutí nástroje má házivost 0,003 mm a maximální doba výměny nástroje je 30 sekund.

Výroba upínačů CoroGrip i jejich princip upínání nástrojů je velmi jednoduchý. Spočívá v teplotní roztažnosti materiálů. Nástrojové držáky jsou vyrobeny z materiálu, jehož ohřevem dojde ke zvětšení otvoru pro upnutí nástroje. Obsluha stroje pouze vloží nástroj do držáku, který se po té ochladí a tím dojde ke smrštění (zmenšení otvoru pro upnutí nástroje) a tím upnutí nástroje. Kromě samotného nástrojového držáku je nutno mít i zařízení, které je schopné nástrojový držák ohřát v krátkém časovém intervalu. Doba ohřevu musí být co nejkratší, proto ohřev vzduchem či jiným médiem není vhodný. Doba ohřevu tímto způsobem se pohybuje v rozmezí několika minut. Pro rychlejší ohřev nástrojového držáku se využívá indukční cívky, kde doba ohřevu se pohybuje okolo 5 sekund. Tato krátká doba stačí na to, aby se povrch držáku ohřál na teplotu 250-300 °C a po té se nástroj do něj vloží. K tepelnému ovlivnění a ani ke změně struktury držáku nehrozí, jelikož změna struktury materiálu držáku se začíná měnit při teplotě blížíící se 500 °C.

Doba chladnutí držáku z teploty 300 °C trvá na vzduchu přibližně 10 – 15 min. a to je příliš dlouhá doba. Doba chladnutí se proto snižuje pomocí chladících zařízení. Při chlazení vzduchem se doba chlazení pohybuje v rozmezí 2 – 5 min. Firma Franz Haimer používá chlazení vodou, ale zároveň dodává zařízení, které neustále ochlazuje chladicí formu, která se nasadí na držák nástroje a při kontaktu s ním odvádí teplo. Tento systém ochlazování snižuje dobu ochlazení držáku na 20 – 30 sekund.

[14]



Obr. 15 Tepelný upínač firmy Heimer [15]



Obr. 16 Upínací přístroj firmy Heimer [15]

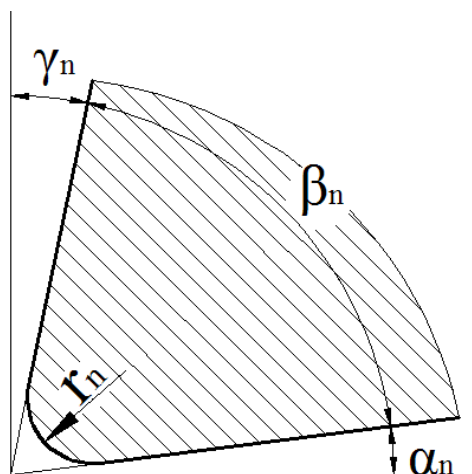
2. HODNOCENÍ MIKROTVRDOTI POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ

Při obrábění vznikají v místě řezu deformace, jak u materiálu odděleného od obráběné části (tříska), tak i pod obrobeným povrchem. Se zvětšující se intenzitou plastické deformace v třísce, jsou deformace obrobeného povrchu menší a postupně se zmenšují se vzdáleností od povrchu. V určité hloubce od povrchu se už projevy deformace způsobené obráběním neobjevují. Deformacím obrobeného povrchu se nazývá zpevnění. Toto zpevnění způsobuje tvrdost povrchu, a tuto tvrdost můžeme změřit. [16]

V technické praxi je velmi často využívána tvrdost, která zároveň patří mezi významné vlastnosti konstrukčních materiálů. Hlavní výhody zkoušek mikrotvrdosti je v jednoduchosti, opakovatelnosti a dále také v tom, že ve většině případů lze měření provádět přímo na výrobku a jeho polotovarech. Je také možné provést zkoušku tvrdosti na tělesech vyrobených a určených pro jiné druhy mechanických zkoušek. Tvrdost můžeme definovat jako odolnost materiálu proti deformaci vyvolané konkrétním vnikajícím tělesem, které má přesně dané geometrické parametry a působí přesně definovaným zatížením. [17]

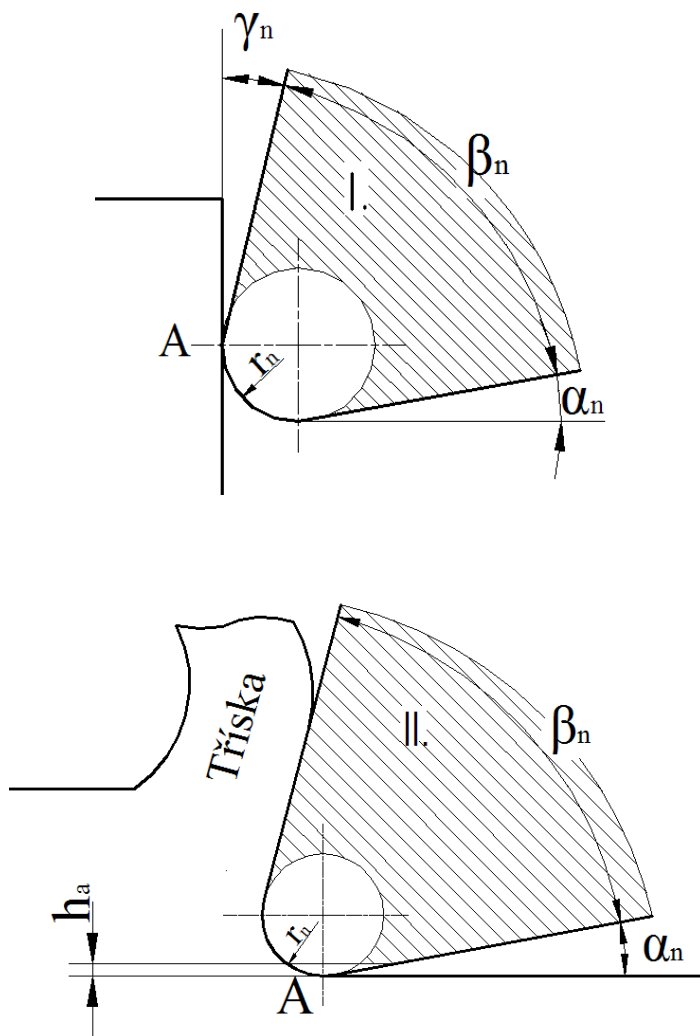
2.1 Vznik zpevněné vrstvy

Základem je si uvědomit, že řezný klín nástroje není nikdy ideálně ostrý a že jeho hřbet a čelo se stýkají ne v přímce, ale ve válcové ploše viz obr. 17.



Obr. 17 Zvětšený řez řezným klínem [16]

Vznik tvorby zpevněné vrstvy lze popsat na obr. 18. Na začátku řezání se řezný klín s materiálem dotýká v bodě A (poloha I). Tento bod určuje na začátku vniknutí řezného klínu oblast největšího napětí. S postupným vřezáváním nože se bod největších napětí snižuje (poloha II).



Obr. 18 Mechanismus vzniku zpevněné vrstvy [16]

Tímto bodem můžeme vést pomyslnou přímkou A , která tvoří dělicí hranici. Vrstva materiálu ležící nad touto přímkou se mění v třísku a kov ležící pod touto pomyslnou přímkou je vtlačován nástrojem a přitom deformován (zpevněn). [16]

2.2 Kritéria hodnocení zpevnění povrchu a jeho měření

Zpevnění obrobeného povrchu se vyjadřuje stupněm zpevnění a hloubkou zpevnění. Reálných hodnot stupně a hloubky zpevnění se zjistí pomocí měření mikrotvrdosti ovlivněné oblasti. Podle hloubky ovlivněné vrstvy si zvolíme metodu postupného odleptávání povrchových vrstev metodu kolmých nebo šikmých řezů.

Metody postupného odleptávání

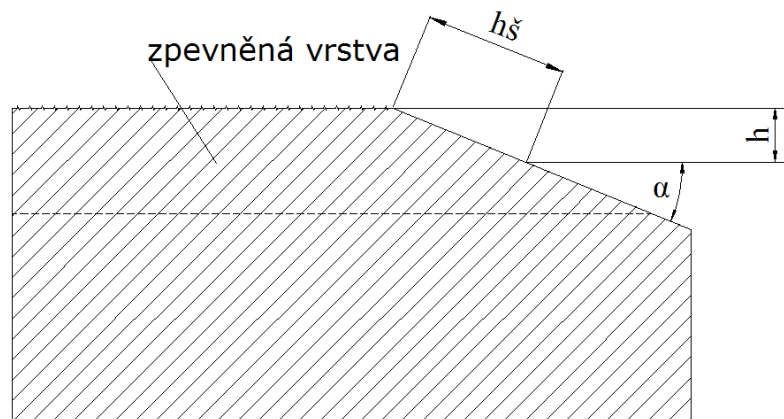
Tato metoda má několik nevýhod. Jedná se zejména o nerovnoměrnost odleptávání, obtížnost měření hloubky odleptané vrstvy, obtížnost měření rozleptaného povrchu vzhledem k nerovnoměrnému povrchu a na konec potřeba zařízení na elektrolytické leptání.

Metoda kolmých řezů

Tato metoda je jednoduchá. Používá se v případech, kde se hloubka zpevnění pohybuje mezi (0,5 – 1 mm). Rozhodující je možný počet vpichů při měření hloubky zpevněné vrstvy.

Metoda šikmých řezů

Tato metoda měření se využívá, pokud vrstva zpevněného materiálu sahá do malé hloubky. Abychom dostali více hodnot mikrotvrdosti ovlivněné vrstvy, měřená plocha se seřízne pod úhlem $\alpha=2^\circ$. Skutečná vzdálenost h vtisku od povrchu se určí pomocí vzorce: $h = h_s \cdot \sin \alpha$



Obr. 19 Vzorek pro zjištění ovlivněné vrstvy[16]

Při zjišťování ovlivněné vrstvy se vpichy provádí postupně od kraje výbrusu (začíná na povrchu vzorku) směrem do středu materiálu. Počet vpichů je takový, až se hodnota mikrotvrdoti ustálí na hodnotě mikrotvrdoti základního nezpevněného materiálu. Jejich počet je u každého materiálu jiný. Vpichy se provádí ve více řadách vedle sebe a z každé hloubky se vyhodnotí průměrná hodnota. Stupeň zpevnění povrchu, který je vyjádřen

$$\varphi = \frac{HV_{MS} - HV_{MZ}}{HV_{MZ}} \cdot 100 \quad (1)$$

HV_{MS} – mikrotvrdot zpevněné vrstvy. [-]

HV_{MZ} – mikrotvrdot základního materiálu. [-] [16]

2.3 Vlastnosti obráběného materiálu ovlivňující zpevnění povrchu

Různé typy kovů se zpevňují při obrábění na různé stupně. Schopnost kovu se plasticky deformovat má hlavní vliv na zpevnění povrchu. Hlavní vliv na plastické deformace kovu má druh jejich krystalické mřížky. Například kovy s hexagonální mřížkou (Ti a jeho slitiny) jsou při obrábění plasticky deformované jen málo. Oceli a jeho slitiny s kubickou plošně centrovanou mřížkou, mezi které patří austenitické a chromniklové oceli (Co, Ag, Cu, Pb) se vyznačují velkým počtem skluzových rovin. Mají malý poměr meze kluzu a pevnosti v tahu, což má za následek, že jsou tyto oceli lehko plasticky neformovatelné. Oceli s prostorově centrovanou mřížkou, jako například vysokopevné oceli (Fe – α a δ , Mo, W, V, Cr) mají menší počet skluzových rovin a větší poměr hodnot meze kluzu a pevnosti v tahu. Proto nejsou tak snadno plasticky neformovatelné, jako oceli s kubickou plošně centrovanou mřížkou. Čím je ocel tvrdší, tím obtížněji se ocel plasticky deformuje a tím menší je hloubka zpevněné vrstvy.

2.3.1 Vliv řezných parametrů na zpevnění povrchu

Řezné parametry mají na zpevněný povrch obrobku při obrábění v mnoha případech podstatný vliv. Čím vyšší je **řezná rychlost**, tím nižší je mikrotvrdot tak i hloubka zpevněné plochy. Další aspekty, které mají na zpevnění povrchu vliv, jsou zkrácení působení řezné síly na povrchu a zvýšení teploty při samotném procesu obrábění. Mikrotvrdot povrchu je také ovlivňována **posuvem** při obrábění. Se zvětšující se hodnotou posuvu se zvětšuje

i mikrotvrdot. **Hloubka řezu** také ovlivňuje mikrotvrdot povrchu, ale zdaleka ne tak jako řezná rychlost a posuv. Ale i tento parametr má za následek, že se zvětšující hloubkou řezu se zvyšuje stupeň zpevnění.

2.3.2 Vliv geometrie řezného klínu na zpevnění povrchu

Hlavní příčinou zpevnění povrchu je poloměr zaoblení řezné hrany. Po dobu, kdy se hrana řezného klínu přetváří do hodnoty $r_n = 0,2 \text{ mm}$, se hloubka zpevněné vrstvy zvětšuje. Po překročení této hodnoty se růst hloubky zpevnění zpomaluje a mikrotvrdot stabilizuje. **Vliv úhlu čela** na zpevnění se liší podle jeho velikosti a zda je kladný či záporný. Je-li úhel čela kladný, pak hloubka ovlivněné vrstvy a tvrdost je velice malá. Ale při použití řezného klínu se záporným úhlem čela vzniká velká tloušťka ovlivněné (zpevněné) vrstvy a nepatrné zvýšení tvrdosti. Používání záporných úhlů čela se používá při zpevňovacím soustružení návarových ploch, dosažení výrazného zpevnění povrchové vrstvy. V porovnání s broušením se pevnost povrchu zvýšila o 70 % a odolnost proti opotřebení o 50 %. **Úhel hřbetu** má vliv na zpevnění povrchové vrstvy jen v určitých mezích. Pohybuje-li se úhel hřbetu v rozmezích hodnot 0 až 8° vzniká výrazný pokles hloubky zpevnění i drsnosti. Jsou-li hodnoty větší než 8° pak úhel hřbetu nemá na hloubku vrstvy zpevnění vliv. Bylo zjištěno, že nejvýhodnější **úhel nastavení** je 45° . Při zvětšování úhlu nastavení mikrotvrdot i hloubka zpevnění nejdříve roste a poté klesá. [16]

2.4 Mikrotvrdot dle Vickerse

Měření mikrotvrdoti se provádí za pomoci diamantového tělesa tvaru Vickersova jehlanu, který se vtlačí do povrchu měřeného tělesa silami od 1 g (0,09807 N) do 1000 g (9,807 N). S klesajícími používanými silami vtisku při měření tvrdosti přesnost měření klesá. Jelikož při zkoušení mikrotvrdoti se využívá malých sil vtisku, je použití této metody vhodné pro:

- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků;
- měření tvrdosti malých vzorků;
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování;
- měření mikrotvrdoti strukturních složek a fází;
- studium difuzních pochodů;

- měření křehkých materiálů;
- hodnocení svarových spojů;
- malé a tenké součásti.

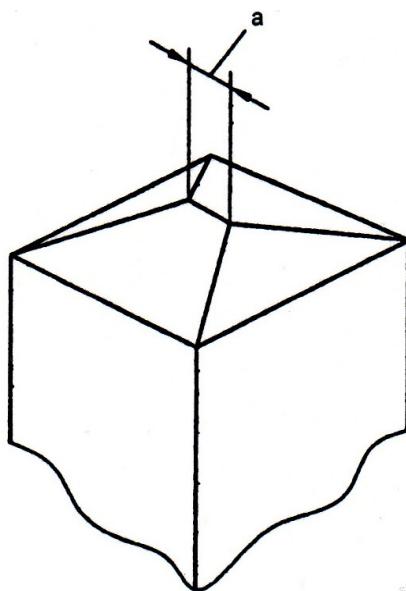
[17],[18]

2.4.1 Podstata zkoušky

Těleso, pomocí kterého měříme mikrotvrdost materiálu, je v tomto případě diamantový pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou (viz obr. 20), který je vtlačován do povrchu zkušebního tělesa. Tvrdost dle Vickerse je poté vyjádřena, jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku. Poměr mezi hloubkou vtisku h a délkami úhlopříček d_1 a d_2 je zhruba 1:7.

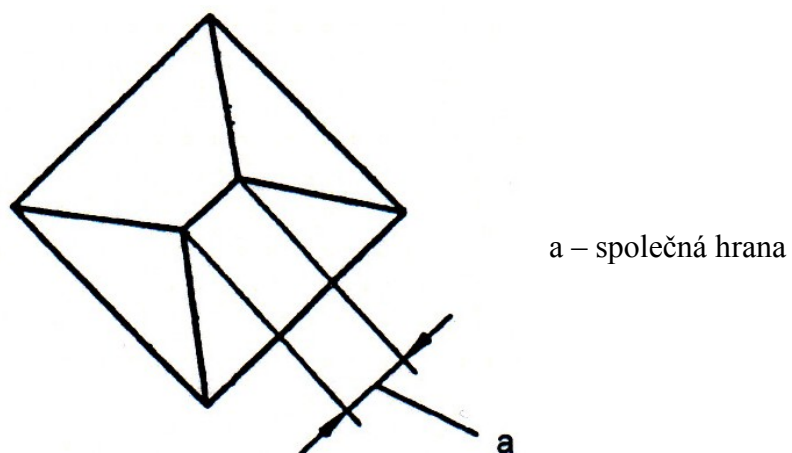
Mezi protilehlými stěnami musí být vrcholový úhel $(136 \pm 0,5)^\circ$. Všechny čtyři stěny jehlanu musí být skloněny pod stejným úhlem vzhledem k ose vnikajícího tělesa a musí se protínat v jednom bodě. Mezi dvěma protilehlými stěnami nesmí délka společné hrany přesáhnout $0,5 \mu\text{m}$. Na obr. 21 lze vidět tvar vrcholu, jak vypadá při velkém zvětšení.

[17],[18]

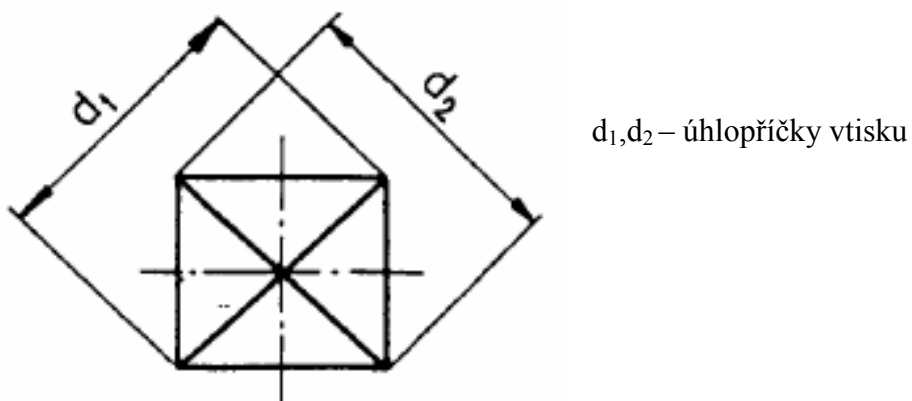


a – společná hrana

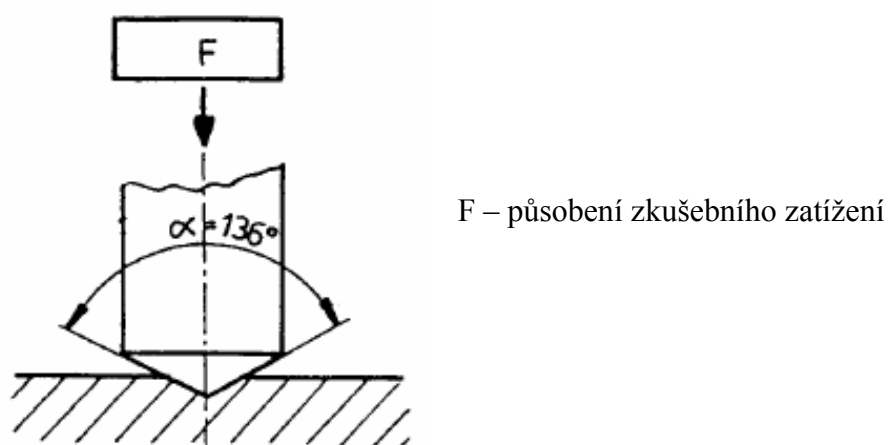
Obr. 20 Vnikající těleso podle Vickerse [18]



Obr. 21 Vrchol vnikajícího tělesa Vickersova jehlanu [18]



Obr. 22 Otisk diamantového tělesa v měřeném povrchu [17]



Obr. 23 Diamantový jehlan při měření mikrotvrdosti [17]

2.4.2 Provedení zkoušky

Vnikající těleso je spouštěno kolmo na zkoušený povrch pod předepsaným zatížením a po předepsanou dobu. Doba zatížení se pohybuje mezi 10 s až 15 s. Je-li doba působení zkušebního zatížení jiná než 10 s až 15 s, musí být zapsána do protokolu o provedení zkoušky. Velikost zkušebního zatížení je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1 Předepsané velikosti zkušebního zatížení podle Vickerse [18]

Materiál	Zkušební zatížení (F)	
	N	Podmínky zkoušky
Povlaky o tvrdosti větší než 300 HV	0,981	HV 0,1
Tvrde anodické oxidické povlaky na hliníku	0,49	HV 0,05
Materiály o tvrdosti menší než 300 HV	0,245	HV 0,025

Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být minimálně pětinasobek délky měřené úhlopříčky. Rychlost vnikajícího zkušebního tělesa nesmí překročit hodnotu 15 $\mu\text{m/s}$. Po odstranění vnikajícího tělesa se za pomoci mikroskopu změří úhlopříčky vtisku, které zanechalo vnikající těleso v zkoušeném materiálu. Pomocí následujícího vzorce se vypočítá tvrdost podle Vickerse.

$$HV = 189,1 \times 10^6 \cdot F / d^2 \quad (2)$$

F – Zkušební zatížení v [N]

d – Aritmetický průměr obou jednotlivě měřených úhlopříček [mm]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

2.4.3 Označení tvrdosti

Tvrdost podle Vickerse se značí velkými písmeny HV. Před těmito písmeny se udává hodnota tvrdosti a za písmeny se uvádí:

- číslo označující velikost použitého zkušebního zatížení (zatížení je udáváno v newtonech násobené činitelem úměrnosti 0,102),
- číslo udávající dobu zatížení v sekundách, pokud je jiná, než je předepsáno.

PŘÍKLAD – 640 HV 0,1 nám vyjadřuje tvrdost podle Vickerse 640, která byla stanovena použitím zkušebního zatížení o velikosti 0,980 N po dobu 10 s až 15 s.

2.4.4 Zkušební těleso

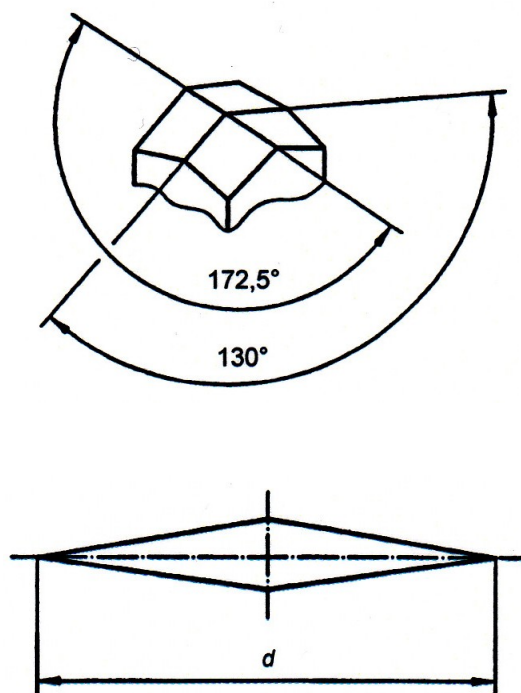
Zkušební vzorek, na kterém se bude provádět zkouška mikrotvrlosti, musí mít rovný a hladký povrch bez okují, mastnoty a jiných nečistot. Hodnocený vzorek se připraví jako metalurgický výbrus. Při přípravě nesmí dojít k tepelnému ovlivnění a deformačním změnám povrchu. Vzorek se připravuje leštěním za mokra na diamantových pastách. Tloušťka zkušebního tělesa musí být minimálně 1,5 násobek délky úhlopříčky vtisku. [17],[18]

2.5 Mikrotvrlost dle Knoop

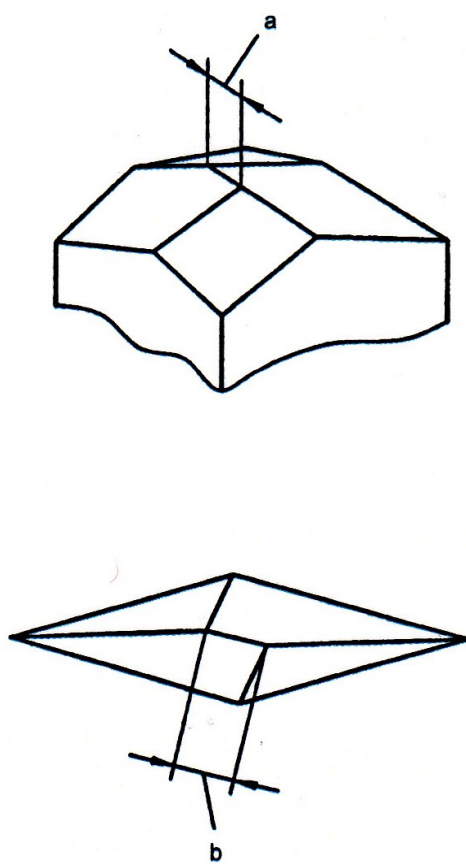
Měření mikrotvrlosti se provádí za pomoci diamantového tělesa tvaru Knoopova jehlanu, který se vtlačí do povrchu měřeného tělesa silami do 1 g (0,09807 N) do 1000 g (9,807 N). Čím menší síly se při měření mikrotvrlosti používají, tím menší přesnost dostáváme. Tato metoda je vhodná pro měření povrchů tvrdosti jako u zkoušky podle Vickerse.

2.5.1 Podstata zkoušky

Těleso Knoopova jehlanu má kosočtvercovou podstavu a diamantovou špičku (viz obr. 24). Tvrdost podle Knoop je vyjádřena poměrem zkušebního zatížení k ploše vtisku. Poměr mezi hloubkou vtisku a délkou delší úhlopříčky je zhruba 1:30. Mezi protilehlými stěnami musí být vrcholové úhly $(172,5 \pm 0,3)^\circ$ a $(130 \pm 0,3)^\circ$. Všechny čtyři stěny jehlanu musí být skloněny pod stejným úhlem vzhledem k ose vnikajícího tělesa a musí se protínat v jednom bodě. Mezi dvěma protilehlými stěnami nesmí délka společné hrany přesáhnout 1,0 μm . Na obr. 25 lze vidět tvar vrcholu při velkém zvětšení.



Obr. 24 Vnikající těleso podle Knoopa [18]



Obr. 25 Vrchol vnikajícího tělesa Knoopova jehlanu [18]

2.5.2 Provedení zkoušky

Vnikající těleso je pomalu spouštěno kolmo na zkoušený povrch pod předepsaným zatížením a po předepsanou dobu. Doba zatížení obvykle působí 10 až 15 s. Při působení jiné doby, než je 10 až 15 s, musí být tento čas zapsán do protokolu o provedení zkoušky. Velikost zkušebního zatížení je uvedeno v tabulce 2.

Tabulka 2 Předepsané velikosti zkušebního zatížení podle Knoop [18]

Materiál	Zkušební zatížení (F)	
	N	Podmínky zkoušky
Povlaky o tvrdosti větší než 300 HK	0,981	HK0,1
Tvrdé anodické oxidické povlaky na hliníku	0,49	HK 0,05
Materiály o tvrdosti menší než 300 HK	0,245	HK 0,025

Hodnota vzdálenosti dvou sousedních vtisků je stejná jako u zkoušky podle Vickerse. Tak i rychlost pohybu vnikajícího tělesa je stejná. Po odstranění vnikajícího Knoopova tělesa se za použití mikroskopu změří úhlopříčky vtisku, které zanechalo vnikající těleso v zkoušeném materiálu. Pomocí následujícího vzorce se vypočítá tvrdost podle Knoop.

$$HK = 1451,4 \times 10^6 \cdot F / d^2 \quad (4)$$

F – Zkušební zatížení v [N]

d – Délka delší úhlopříčky [mm] (viz obr. 24)

2.5.3 Označení tvrdosti

Tvrdost podle Knoop se značí velkými písmeny HK. Před písmeny se udává hodnota tvrdosti a za písmeny se uvádí:

- číslo označující velikost použitého zkušebního zatížení (zatížení je udáváno v newtonech násobené činitelem úměrnosti 0,102)
- číslo udávající dobu zatížení v sekundách, pokud je jiná, než je předepsáno

PŘÍKLAD – 640 HK 0,1/20 nám vyjadřuje tvrdost podle Knoop 640, která byla stanovena použitím zkušebního zatížení o velikosti 0,980 N po dobu 20 s.

2.5.4 Zkušební těleso

Stejně jako při měření dle Vickerse musí být zajištěno přesné změření delší úhlopříčky vtisku. Povrch zkušebního vzorku musí být rovný a hladký, bez okují mastnoty, a jiných cizích tělísek. Hodnocený vzorek se připravuje stejně jako při zkoušce dle Vickerse, tzn. jako metalografický výbrus. Vzorek se vytváří pomocí broušení a zamokra leštěním pomocí diamantových past. [17],[18]

2.6 Aspekty ovlivňující přesnost měření

2.6.1 Zkušební zatížení

Získané hodnoty při měření mikrotvrdosti jsou závislé na použitém zatížení více, než je tomu při měření tvrdosti. Místo, kde bylo provedeno měření, musí být označeno na zkušebních vzorcích a oblast měření musí být uvedena v protokolu o zkoušce. Měření se musí provádět při stejném zatížení a po celou dobu, aby byly získány srovnatelné hodnoty tvrdosti. Při použití nejvyššího přípustného zatížení se dosáhne nejpřesnějších hodnot.

2.6.2 Rychlost vnikajícího tělesa

Je-li rychlost vnikajícího tělesa při zatlačování příliš velká, získá se příliš nízká hodnota tvrdosti. Velikost rychlosti vnikajícího tělesa musí být taková, aby při jejím snižování nedošlo ke změně naměřené hodnoty. Při měření tvrdosti se musí měřit i časový průběh za pomoci vhodného přístroje. Během celé doby zatěžování se nesmí překročit předepsané zatížení. Pro zjištění správné rychlosti vnikajícího tělesa se musí provést opakované zkoušky, při kterých se postupně snižuje rychlost. Rychlost, která se bude při zvoleném zatížení používat, je taková, při které se již výsledek měření nemění.

2.6.3 Čas působení zkušebního zatížení

V případě, že doba působení zatížení je menší než 10 s, může naměřená hodnota vtisku záviset na čase a velikost hodnoty tvrdosti bude příliš vysoká. Materiály, u kterých dochází při pokojové teplotě k výraznému tečení, má doba působení zatížení velmi výrazný účinek. Při působení delší doby zatížení se může zvýšit citlivost k vibracím.

2.6.4 Vibrace

Vážný zdroj chyb při měření mikrotvrdomosti představují vibrace. Jejich vliv se zvětšuje se zmenšující se zkušebním zatížením. Při působení vibrací během zkušebního zatížení se naměří nižší hodnoty mikrotvrdomosti. Tento zdroj chyb můžeme zjistit z pomoci změření na vzorku, který má mikrotvrdomost velmi blízkou jako má zkoušený materiál. Vliv vibrací můžeme zmírnit izolováním přístroje například izolační deskou od jeho okolního prostředí.

Další zdroje vibrací jsou větráky, klimatizace, silniční hluk, atd. Tento hluk není možné regulovat izolační deskou, a proto může přispět k chybám v měření mikrotvrdomosti a tím ke snížení naměřených hodnot.

2.6.5 Povrch vzorku a jeho stav

Drsnost

Je-li povrch zkoušeného vzorku drsný, je možné že se nedosáhne přesného měření délky úhlopříčky vtisku. Proto se mikrotvrdomost nejčastěji měří na příčném řezu. Vzorek měřeného povrchu je možné před samotným měřením mechanicky, elektrochemicky nebo chemicky vyleštit. Během leštění nesmí dojít ke změnám zkoušeného povrchu, které by ovlivnily naměřenou tvrdost.

Zakřivení povrchu

Je-li zkušební povrch zakřivený, vnáší do měřené hodnoty mikrotvrdosti určitou chybu. S klesajícím poloměrem křivosti její chyba roste.

2.6.6 Orientace

Tuhost

Zkušební vzorek musí být během zkoušky upevněn tak, aby nedošlo k jeho posunu. Zkušební vzorek musí být upevněn tak, aby jeho povrch byl kolmý ke směru působení zatížení, jinak by mohlo dojít k deformaci vtisku. Zajištění tuhého upnutí zkušební vzorku je vyžadováno po celou dobu zkoušky. V průběhu celé zkoušky nesmí zkušební vzorek změnit polohu o více než 0,5 μm .

Nastavení zkušební vzorku

V případě, že povrch zkoušeného materiálu nebude kolmo k ose vnikajícího tělesa, budou měření neplatná. Přesných výsledků lze dosáhnout jen v případě, že odchylka kolmosti je menší než 0,5 °.

2.6.7 Poloha vtisku

Naměřená hodnota mikrotvrdosti může být ovlivněna blízkostí jiného materiálu než je povrch vzorku. Např. pokud se vtisk provede v těsné blízkosti podkladu a tento podklad je měkčí než povrch vzorku, může dojít k tomu, že naměřená hodnota mikrotvrdosti bude menší. Pokud materiál obsahuje cizí tělíska jako jsou vměstky a usazeniny, může být naměřená hodnota v blízkosti těchto materiálových anomálií nepřesná. [18]

3. NÁVRCH A PROVEDENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE

3.1 Návrh experimentální části práce

Pro provedení experimentální části práce byly použity materiály 15 128 a ASP 2023. Experiment byl proveden za použití dvou různých nástrojů od firmy KENNAMETAL, a to vše na stroji DMU 60 monoBLOCK jehož výrobcem je firma Deckel Maho.

3.1.1 Použitý stroj

Pro provedení experimentální části práce bylo použito 5ti osé CNC frézovací centrum s označením DMU 60 MonoBlock firmy Deckel Maho. Tento stroj byl zvolen pro provedení experimentu z důvodů jeho možnosti nastavení vysokých otáček v rozsahu 1 až 24.000 min⁻¹ a nastavení pracovního posuvu až 24 m.min⁻¹, což bylo kritérium výběru stroje. Součástí výbavy stroje je DMG řídicí panel s 15“ TFT obrazovkou a také 3D software. Stroj je ovládán řídicím systémem Heidenhain iTNC 530.



Obr. 26 Frézovací centrum DMU 60 monoBLOCK [19]

Technické údaje obráběcího centra: [20]

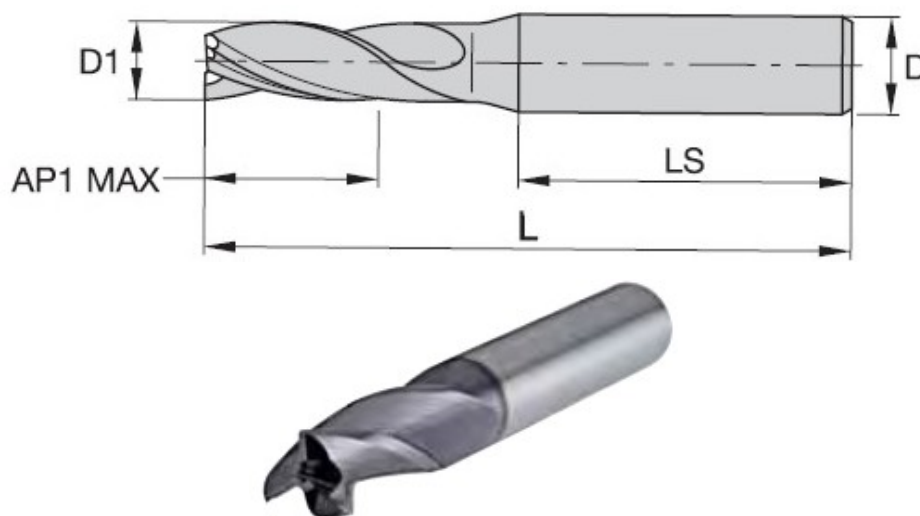
Počet os	5 os
Pracovní rozsah	730/560/560 mm
Posuv	24/24/24 mm
Plocha stolu	1000 x 600 mm
Točivý moment	130 Nm
Otáčky vřetene	1 – 24 000 min ⁻¹
Maximální hmotnost obrobku	700 kg

3.1.2 Použité nástroje

K experimentu byly použity dvě frézy od firmy Kennametal. Tyto frézy nesou označení F3AH1600ADL30 a F4AJ1800ADN30.

Popis frézy s označením F3AH1600ADL30

Pod tímto označením se skrývá tříbřitá stopková karbidová fréza s průměrem 16 mm a stoupáním šroubovice 30°. Díky tuhému tělesu a konstrukci s dostatečně velkou zubovou mezerou, která zaručuje plynulý odvod třísek je tato fréza vhodná pro obrábění při vysokých rychlostech řezání.



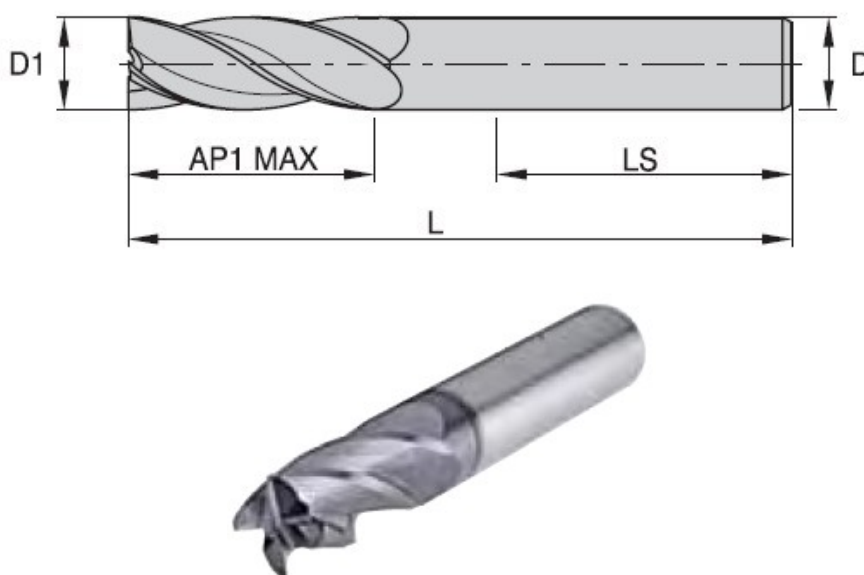
Obr. 27 Fréza s označením F3AH1600ADL30 [21]

Tabulka 3 Technické údaje frézy F3AH1600ADL30 [21]

D1 - řezný průměr nástroje	16 mm
D - průměr stopky nástroje	16 mm
L - celková délka nástroje	92 mm
LS - použitelná délka stopky nástroje	48 mm
Ap1max - maximální využitelná délka řezné části nástroje	26 mm

Popis frézy s označením F4AJ1800ADN30

Pod tímto označením se skrývá čtyřbřitá stopková karbidová fréza s průměrem 18 mm a stoupáním šroubovice 30°. Tato fréza má obdobné využití jako výše zmíněná fréza F3AH1600ADL30.

**Obr. 28** Fréza s označením F4AJ1800ADN30 [21]**Tabulka 4** Technické údaje frézy F4AJ1800ADN30 [21]

D1 - řezný průměr nástroje	18 mm
D - průměr stopky nástroje	18 mm
L - celková délka nástroje	92 mm
LS - použitelná délka stopky nástroje	48 mm
Ap1max - maximální využitelná délka řezné části nástroje	32 mm

Tyto použité frézy jsou celokarbidové s PVD povlaky. Jedná se o vícevrstvé povlaky TiN, TiCN a TiC(N). Fyzikálně nanesený PVD povlak TiN má oproti chemickému CVD povlaku výrazně lepší vlastnosti z hlediska opotřebení bříty nástroje. Využití těchto povlaků je vhodné zejména pro suché a tvrdé obrábění. Povlaky používané při obrábění HSC technologií musí mít tloušťku co nejmenší, často méně než 10 μm . Se zvětšující se tloušťkou povlaku na bříty nástroje se zvětšuje i zaoblení řezné hrany, což má negativní vliv na samotný proces obrábění, zejména na přesnost a drsnost obrobeného povrchu.



Obr. 29 Schéma použitého vícevrstvého povlaku [21]

Při experimentu se nepoužije a nesmí použít žádná procesní kapalina, jelikož by při HSC zabránila vzniku vysokorychlostního efektu.

3.1.3 Materiály vzorků použitých pro experiment

Pro provedení experimentu byly vybrány 2 materiály. Ocel 15 128 Cr-Mo-V a ocel ASP 2023.

Ocel 15 128 Cr-Mo-V ČSN 41 5128

Tato ocel se řadí mezi žárovevné a je vhodná pro použití na součásti energetických a chemických zařízení pracujících při teplotách do 580 $^{\circ}\text{C}$.

Tabulka 5 Chemické složení oceli 15 128

Obsah prvků	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
[%]	0,10 0,18	0,45 0,70	0,15 0,40	0,50 0,75	0,40 0,60	0,22 0,35	max 0,040	max 0,040

Tabulka 6 Mechanické vlastnosti oceli 15 128

Mechanické vlastnosti	$R_p 0,2$ [MPa]	R_m [MPa]	A5 [%]	Tvrdost [HB]	E [GPa]
15 128	294	470 - 640	18	135 - 183	214

ASP 2023

Ocel ASP 2023 je bezkobaltová rychlořezná ocel určena pro práci za studena. Je vyráběna metodou práškové metalurgie a vyznačuje se vysokou tvrdostí, houževnatostí a odolností proti otěru. Ocel ASP 2023 je vhodná pro výrobu nástrojů na stříhání, ražení, ohýbání a dále pro výrobu řezných nástrojů, jako jsou tvarové nože a frézy.

Tabulka 7 Chemické složení oceli ASP 2023

Obsah prvků	C	Cr	Mo	W	Co	V
[%]	1,28	4,1	5	6,4	-	3,1

Mechanické vlastnosti oceli ASP 2023, která byla použita při experimentu a dodaná firmou Bohdan Bolzano s.r.o. nebyly nikde ke zjištění. A ani samotná firma mi neposkytla tyto informace.

3.1.4 Použité řezné podmínky pro experiment

Materiál je obroben čelním frézováním při použití řezných parametrů uvedených v tabulce 8 a 9.

Tabulka 8 Navržené řezné parametry pro obrábění oceli 15128

Zkoušený materiál	Počet břitů frézy z [-]	Průměr frézy Df [mm]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Označení frézy
Ocel 15128	3	16	0,25	0,33	F3AH1600ADL30
	4	18	0,25	0,25	F4AJ1800ADN30

Tabulka 9 Navržené řezné parametry pro obrábění oceli ASP 2023

Zkoušený materiál	Počet břitů frézy z [-]	Průměr frézy Df [mm]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Označení frézy
Ocel ASP 2023	3	16	0,25	0,33	F3AH1600ADL30
	4	18	0,25	0,25	F4AJ1800ADN30

Vzorky materiálů jsou ofrézovány nástroji s řeznými parametry uvedenými v tabulkách 11 a 12 a proměnnými hodnotami posuvu v_f a otáčkami n , které se spočítají podle vzorce (5).

Tabulka 10 Rychlost posuvu v_f , otáčky n a řezná rychlost v_c pro frézu o průměru 16 mm

Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
5	5000	251
10	10000	503
15	15000	754
20	20000	1005
24	24000	1206

Jako příklad výpočtu jsem vybral materiál 15 128, řezné parametry $f_z = 0,33$ mm, $n = 5000$ min⁻¹ a frézu s označením F3AH1600ADL30. ($Df=16$ mm, a $z = 3$ mm)

Příklad výpočtu rychlosti posuvu v_f

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm.min}^{-1}] \quad (5)$$

$$v_f = 0,99 \cdot 5000 = 0,33 \cdot 3 \cdot 5000 = 4950 \quad [\text{mm.min}^{-1}]$$

Příklad výpočtu řezné rychlosti v_c

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m.min}^{-1}] \quad (6)$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot 16 \cdot 5000}{1000} = 251 \quad [\text{m.min}^{-1}]$$

Zde uvádím již vypočtené použité řezné parametry pro materiály 15 128 a ASP 2023.

Tabulka 11 Použité řezné parametry pro ocel 15 128

Ocel 15 128				Ocel 15 128			
Třízubá fréza				Čtyřzubá fréza			
$a_p=0,25\text{mm}$; $f_z=0,33\text{mm}$; $D_1=16\text{mm}$; $z=3$				$a_p=0,25\text{mm}$; $f_z=0,25\text{mm}$; $D_1=18\text{mm}$; $z=4$			
Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
28	5	5000	251,3	23	5	5000	282,7
29	10	10000	502,7	24	10	10000	565,5
30	15	15000	754,0	25	15	15000	848,2
31	20	20000	1005,3	26	20	20000	1131,0
32	24	24000	1206,4	27	24	24000	1357,2

Tabulka 12 Použité řezné parametry pro ocel ASP 2023

Ocel ASP 2023				Ocel ASP 2023			
Třízubá fréza				Čtyřzubá fréza			
$a_p=0,25\text{mm}$; $f_z=0,33\text{mm}$; $D_1=16\text{mm}$; $z=3$				$a_p=0,25\text{mm}$; $f_z=0,25\text{mm}$; $D_1=18\text{mm}$; $z=4$			
Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
18	1	1000	50	22	10	10000	566
17	5	5000	251	19	15	15000	848
16	10	10000	503	20	20	20000	1131
13	15	15000	754	21	24	24000	1357
14	20	20000	1005				
15	24	24000	1206				

3.2 Realizace experimentu

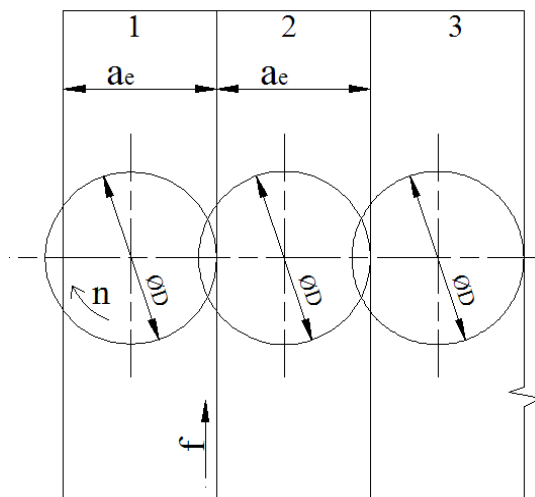
Experiment byl proveden podle výše uvedeného návrhu experimentu. Experiment byl proveden v Polsku za asistence Poznan University of Technology.



Obr. 30 Ukázka frézování materiálu 15 128

3.2.1 Postup frézování

Veškeré experimenty byly provedeny čelním sousledným frézováním. Schéma postupu frézování lze vidět na obr. 31.



Obr. 31 Schéma postupu frézování

3.2.2 Obrobení zkušebních vzorků

Ocel 15 128

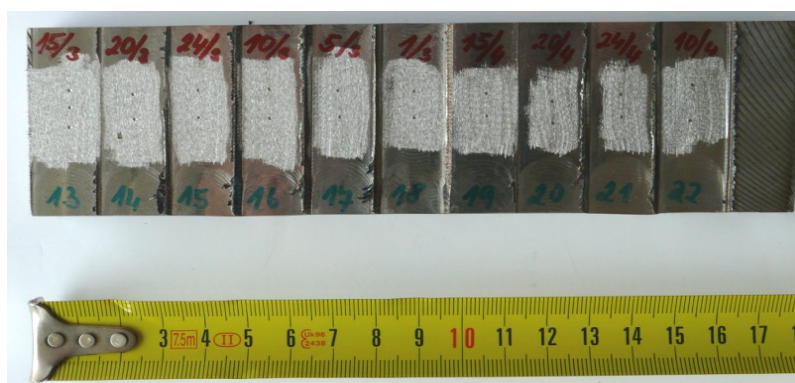
Na obr. 32 lze vidět zkoušený, již ofrézovaný materiál 15 128. Plochy označené čísly 23 až 27 byly ofrézovány čtyřbřitou frézou o průměru 18 mm, rychlosti posuvu byly $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $24 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Plochy s označením 28 až 32 byly ofrézovány tříbřitou frézou o průměru 16 mm, za použití stejných posuvů jako u čtyřbřité frézy.



Obr. 32 Vzorek ofrézovaného materiálu 15 128

Ocel ASP 2023

Na obr. 33 lze vidět ofrézovaný materiál ASP 2023. Plochy s označením 13 až 18 jsou ofrézované tříbřitou frézou o průměru 18 mm, rychlosti posuvu byly $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $24 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Plochy označené 19 až 22 jsou ofrézované čtyřbřitou frézou o průměru 18 mm a rychlosti posuvy byly $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $24 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



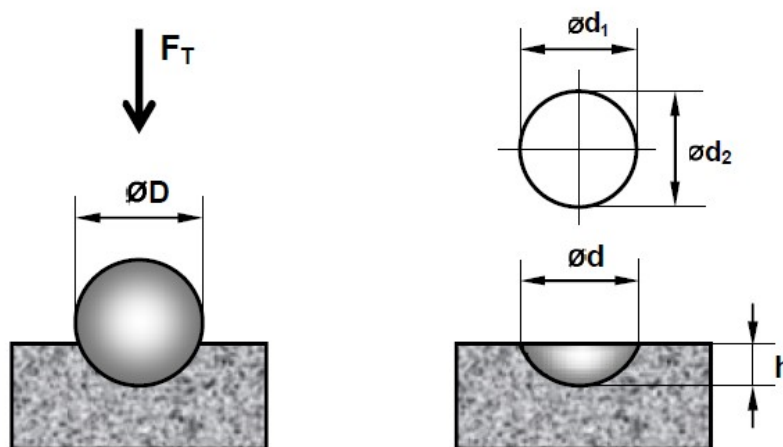
Obrázek 33 Vzorek ofrézovaného materiálu ASP 2023

3.2.3 Stanovení tvrdosti základního materiálu

Tvrdost se řadí mezi vlastnosti mechanické. V oblasti strojírenství je tato vlastnost materiálu jednou z hlavních, především při obrábění kovů je tato vlastnost velmi důležitá.

Navržená metoda měření tvrdosti bude provedena podle Brinella, jelikož je vhodná pro zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů. Pro návrh měření tvrdosti podle Brinella byla použita norma ČSN EN ISO 6506.

Tvrdost je vlastně odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Měření tvrdosti podle Brinella se provádí za pomoci ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu o průměru ϕD , která se vtlačí do povrchu měřeného tělesa. Po odlehčení a odstranění kuličky se změří průměr vtisku. Měření průměru vtisku se provádí dvakrát kolmo na sebe pro vyloučení chyby vzniklé nepřesností vtisku. Doba působení se pohybuje mezi 10 až 15 s. Před provedením zkušebních vtisků na zkušebních vzorcích byly plochy vzorků řádně připraveny broušením.



Obr. 34 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Pomocí vzorců (7), (8), (9) se vypočítá tvrdost podle Brinella.

$$HBS(HBW) = 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi \cdot \phi D \cdot (\phi D - \sqrt{\phi D^2 - \phi d^2})} \quad (7)$$

$$\phi d = \frac{\phi d_1 + \phi d_2}{2} \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

$$h = \frac{(\phi D - \sqrt{\phi D^2 - \phi d^2})}{2} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

HBS – tvrdost podle Brinella při použití ocelové kuličky [-]

HBW – tvrdost podle Brinella při použití kuličky z tvrdokovu [-]

F – použité zkušební zatížení [N]

$\varnothing D$ – průměr kuličky [mm]

$\varnothing d$ – aritmetický průměr vtisku [mm]

$$\text{konstanta } 0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,807}$$

Proces měření tvrdosti byl proveden na tvrdoměru EmcoTest.



Obr. 35 Tvrdoměr EmcoTest

Podle ČSN EN 6506 byla stanovena hmotnost zkušebního zatížení na hodnotu 187,5 kg. Velikost působící síly se vypočítá pomocí vzorce (10).

$$F = m \cdot g \text{ [N]} \tag{10}$$

F – velikost působící síly [N]

m – hmotnost zkušebního zatížení [kg]

g – velikost gravitačního zrychlení ($g = 9,807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

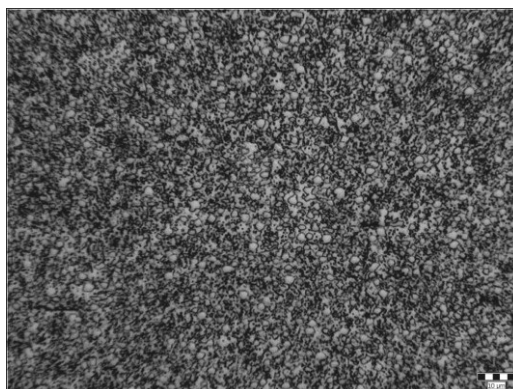
Velikost působící síly byla vypočtena na cca 1839 N.

Každá ofrézovaná plocha byla měřena 10 krát.

Pomocí metalografického mikroskopu NEOPHOT 21 (viz obr. 38) byly zjištěny mikrostruktury základních materiálů. Obr. 36 znázorňuje feriticko-perlitickou strukturu materiálu 15 128. A obr. 37 ukazuje sekundární karbidy v rozpuštěném martenzitickém základu materiálu ASP 2023.



**Obr. 36 Metalografický detail materiálu 15 128
(zvětšení 200x, použité leptadlo Nital 1 %)**



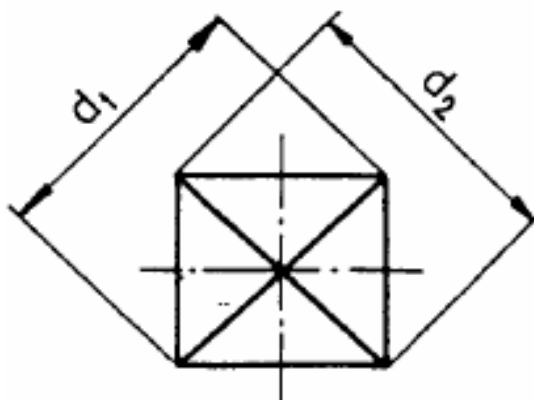
**Obr. 37 Metalografický detail materiálu ASP 2023
(zvětšení 500x, použité leptadlo Nital 1 %)**



Obr. 38 Při experimentu používaný mikroskop NEOPHOT 21

3.2.4 Stanovení mikrotvrdomosti

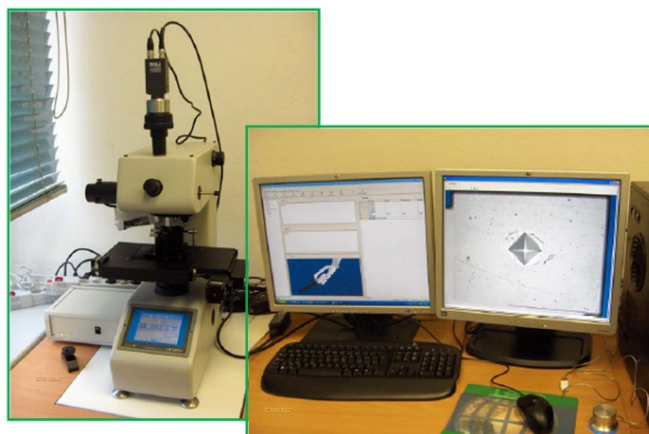
Navržená metoda měření tvrdosti byla provedena podle Vickerse, jelikož je vhodná pro zkoušení kalených materiálů a tvrdých povlaků. Pro návrh měření tvrdosti podle Vickerse byla použita norma ČSN EN ISO 4516. Navržená metoda měření mikrotvrdomosti bude provedena podle Vickerse za pomoci vnikajícího tělesa tvaru jehlanu. Jehlan se vtlačí do materiálu na dobu 10 až 15 s. Po odlehčení a odstranění vnikajícího jehlanu se změří vzniklé úhlopříčky.



Obr. 39 Schéma otisku kužele

Po odečtení délek úhlopříček z otisku v materiálu se vypočte průměrná hodnota průměru otisku podle vzorce (3) a hodnota tvrdosti podle vzorce (2).

Každý zkoušený vzorek obsahuje 10 za sebou jdoucích vpichů umístěných kolmo na povrch zkoušeného materiálu. Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno v laboratoři metalografie na VŠB TU Ostrava. Měření bylo provedeno na mikrotvrdoměru LECO (LM-247AT).



Obr. 40 Mikrotvrdoměr LECO

Podle normy ČSN EN ISO 4516 byla stanovena hmotnost zkušebního zatížení na hodnotu 0,1 kg. Velikost působící síly se vypočítá pomocí vzorce (10). Velikost působící síly byla vypočtena na cca 0,9807 N.

Pomocí metalografického mikroskopu NEOPHOT 21 (viz obr. 38) byly zjištěny mikrostruktury ovlivněných vrstev zkoušených materiálů. Ovlivněná vrstva materiálu 15 128 byla složena z feriticko-perlitické struktury s karbidy. V materiálu ASP 2023 byly nalezeny hustě vyloučené bodové karbidy v jemném martenzitickém základu. Vzniklé bodové karbidy jsou důsledkem působení tepla a deformačního zpevnění povrchu materiálu během procesu obrábění.



**Obr. 41 Metalografický detail zpevněné vrstvy
(zvětšení 500x, použité leptadlo Nital 1%)**

4. MĚŘENÍ A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT

4.1 Stanovení nejistoty měření

Nejistota typu A (u_A) a kombinovaná nejistota (u_C) se stanoví pro každou naměřenou plochu vzorku.

Standardní nejistota typu A (u_A) se vypočte za pomoci směrodatné odchylky $s(\bar{x})$

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x}^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (11)$$

$s(\bar{x})$ směrodatná odchylka

x_i naměřené hodnoty veličiny

$$\bar{x} \quad \text{průměrná hodnota výběru} \quad \left(\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (12)$$

n počet naměřených hodnot

Standardní nejistota typu B

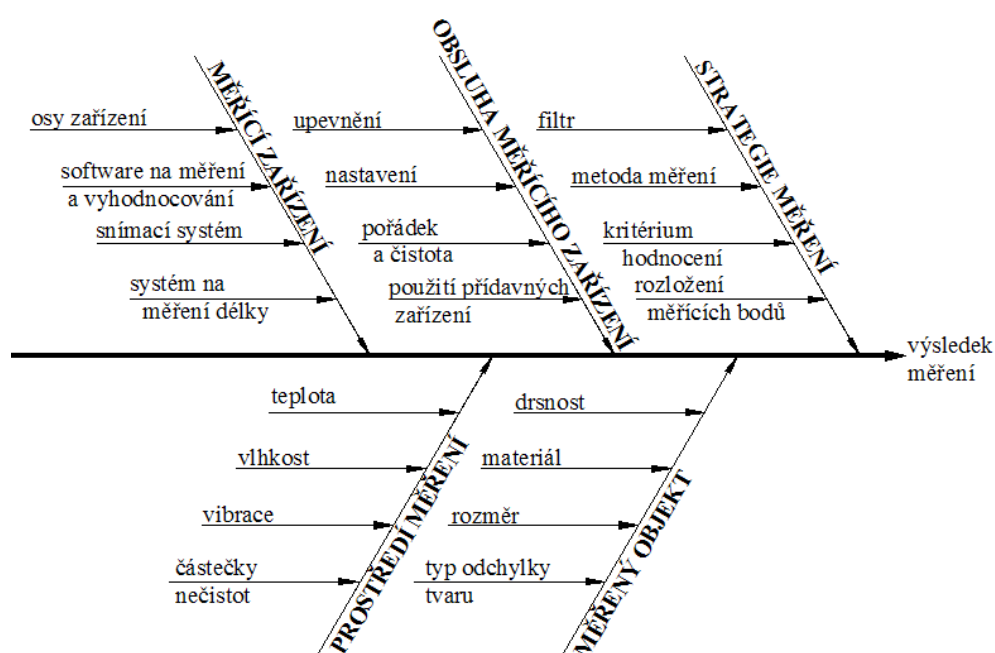
Hodnota standardní nejistoty typu B se stanovuje z jednotlivých zdrojů nejistot. Tyto zdroje jsou identifikovatelné pro konkrétní měření a jejich hodnoty nezávisí na počtu opakovaných měření.

$$u_B = \sqrt{\sum_i u_{Bi}^2} \quad (13)$$

u_{bi} součet kvadrátů všech zdrojů nejistot typu B

Vlivy přispívající k nejistotě měření typu B se dělí do několika skupin:

- ❖ měřicí zařízení (osy zařízení, systém na měření délky, snímací systém, software na měření a vyhodnocování);
- ❖ obsluha měřicího zařízení (nastavení, upevnění, konfigurace hrotu, použití přídavných zařízení, pořádek a čistota);
- ❖ strategie měření (metoda měření, rozložení měřicích bodů, kritérium hodnocení, filtr);
- ❖ prostředí měření (teplota, vlhkost, vibrace);
- ❖ měřený objekt (vlnitost, drsnost, materiál, rozměr).



Obr. 42 Faktory ovlivňující výsledek měření

Kombinovaná nejistota typu C (u_c) se vypočte za pomoci vzorce (14)

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (14)$$

u_A standardní nejistota typu A

Rozšířená kombinovaná nejistota U_c se vypočte za pomoci vzorce (15)

$$U_c = k_u \cdot u_c \quad (15)$$

u_c rozšířená kombinovaná nejistota

k_u koeficient rozšíření; úroveň spolehlivosti je 95 %, proto $k_u=2$

4.2 Příklad výpočtu tvrdosti a určení nejistoty měření

Příklad výpočtu je proveden pro materiál 15 128 za použití frézy s označením F3AH1600ADL30 a následujícími řeznými parametry: $v_f = 5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $n = 5000 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$, $f_z = 0,33 \text{ mm}$, $v_c = 251 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Do výpočtu nebyla zahrnuta standardní nejistota typu B z důvodu vstupu velkého množství vlivů přispívajících k nejistotě měření.

Měření bylo provedeno na tvrdoměru EmcoTest

Tabulka 13 Příklad naměřených hodnot tvrdosti

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HB x_i [-]	237	240	242	239	240	238	237	242	239	238

Výpočet průměrné hodnoty \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \cdot (237+240+242+239+240+238+237+242+239+238) = \text{HB } 239,2 \quad (12)$$

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x}^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{74,75}{9}} = 8,305$$

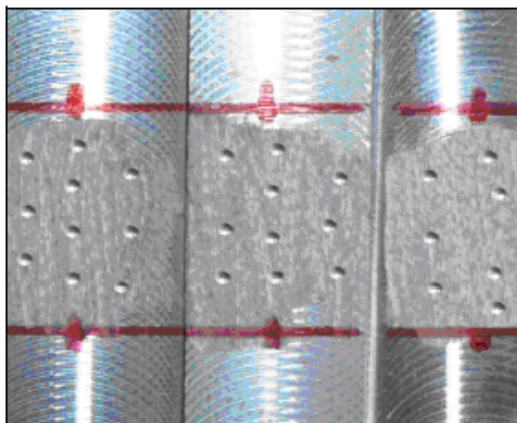
$$u_C = \sqrt{u_A^2} = \sqrt{8,305^2} = 8,305$$

$$U_C = k_u \cdot u_c = 2 \cdot 8,305 = 16,61$$

Hodnota tvrdosti zkoušeného materiálu 15 128 za použití frézy s označením F3AH1600ADL30 a následujícími řeznými parametry: $v_f = 5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $n = 5000 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$, $f_z = 0,33 \text{ mm}$, $v_c = 251 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je **HB 239,2 ± 16,61**.

4.3 Výsledky měření a vyhodnocení tvrdosti povrchu materiálu

Každá plocha zkušebního vzorku obsahuje 10 vpichů, ze kterých byla zjištěna tvrdost jednotlivých vzorků.



Obr. 43 Vzorky materiálu po provedení měření tvrdosti

Vyhodnocení tvrdosti povrchu materiálu 15 128

Tabulka 14 Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu 15 28

Ocel 15 128			Ocel 15 128		
Třízubá fréza			Čtyřzubá fréza		
$a_p=0,25$ mm; $f_z=0,33$ mm; $DI=16$; $z=3$			$a_p=0,25$ mm; $f_z=0,25$ mm; $DI=18$; $z=4$		
Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	HBW 2,5/187,5 [-]	Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	HBW 2,5/187,5 [-]
32	5	239,20 ± 16,61	27	5	233,60 ± 16,22
31	10	240,20 ± 16,75	26	10	236,50 ± 16,41
28	15	248,40 ± 17,25	23	15	243,20 ± 16,92
29	20	244,1 ± 16,97	24	20	243,10 ± 16,87
30	24	243,20 ± 16,89	25	24	236,60 ± 16,45

Při rychlosti posuvu 15 m.min⁻¹ bylo dosaženo nejvyšší hodnoty tvrdosti, která činí cca 248 HB za použití tříbřité frézy. Naopak nejnižší hodnoty tvrdosti bylo dosaženo při rychlosti posuvu 5 m.min⁻¹ za použití čtyřbřité frézy, která činí cca 233 HB.

Vyhodnocení tvrdosti povrchu materiálu ASP 2023**Tabulka 15 Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu ASP 2023**

Ocel ASP 2023			Ocel ASP 2023		
Třízubá fréza			Čtyřzubá fréza		
$a_p=0,25$ mm; $f_z=0,33$ mm; $DI=16$; $z=3$			$a_p=0,25$ mm; $f_z=0,25$ mm; $DI=18$; $z=4$		
Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	HBW 2,5/187,5 [-]	Označení plochy	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	HBW 2,5/187,5 [-]
18	1	258,4±18,26	22	10	257,5±18,14
17	5	266±18,78	19	15	255,6±18,52
16	10	264,8±18,88	20	20	262±18,77
13	15	262,4±19,21	21	24	268,3±19,59
14	20	259,5±18,30			
15	24	265,2±18,62			

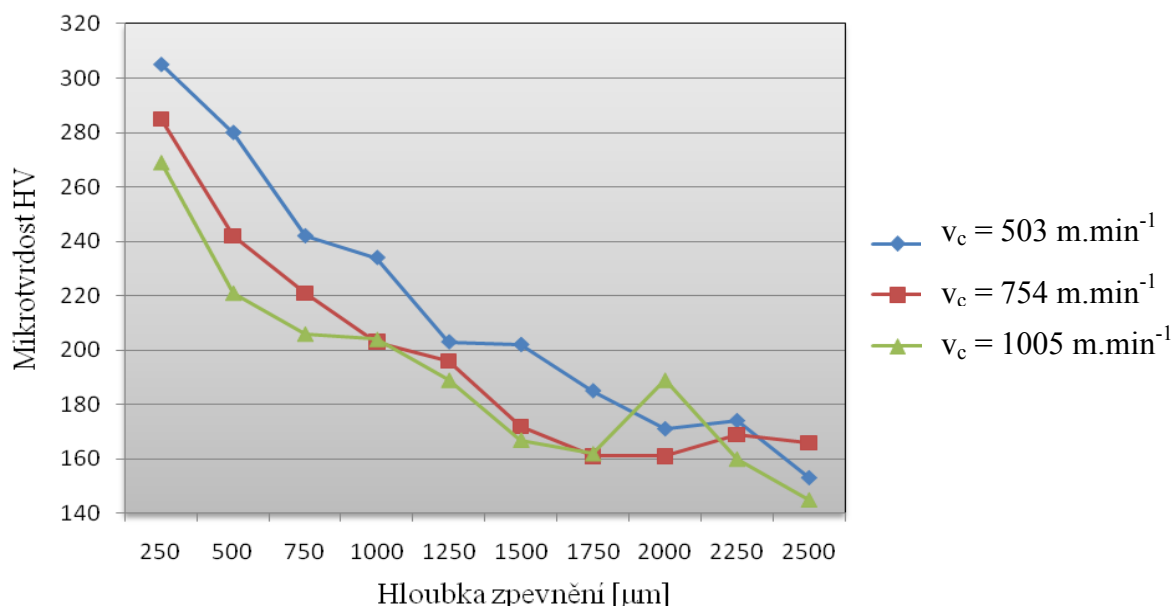
Nejvyšší hodnoty, která činí cca 268 HB bylo dosaženo při rychlosti posuvu 24 m min⁻¹ za použití čtyřbřité frézy. Naopak nejnižší hodnoty tvrdosti bylo dosaženo při rychlosti posuvu 15 m.min⁻¹ také za použití čtyřbřité frézy, která činí cca 256 HB.

4.4 Výsledky měření a vyhodnocení mikrotvrdosti

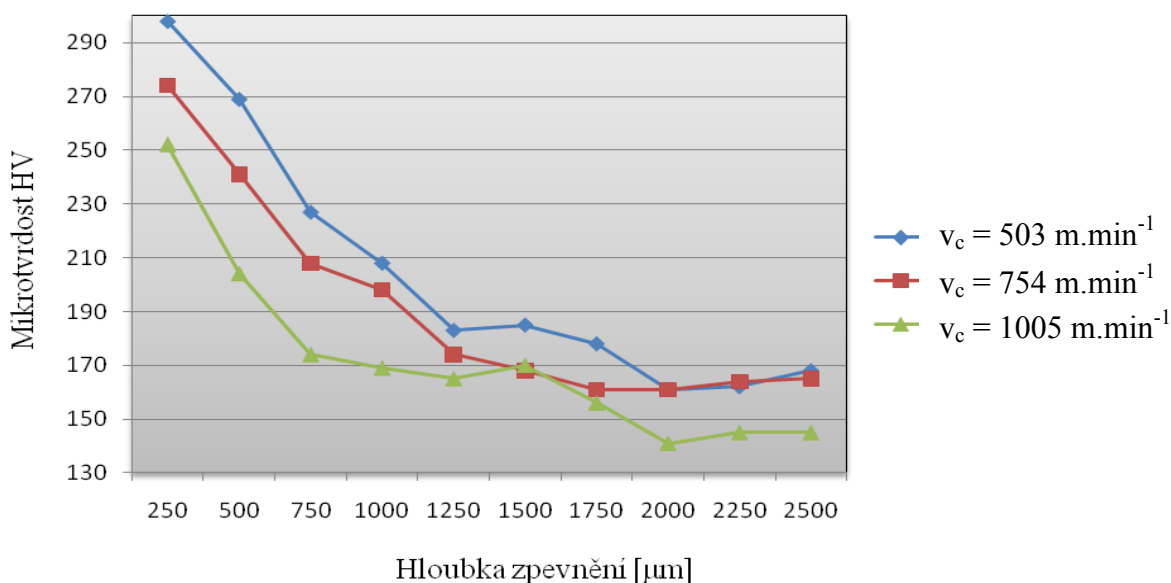
Každá plocha zkušební vzorku obsahuje 10 vpichů umístěných v řadě za sebou kolmo na povrch zkušební materiálu. Vzdálenost mezi jednotlivými vpichy je 250 μm. Měření mikrotvrdosti bylo provedeno v laboratoři metalografie na VŠB TU Ostrava. Měření bylo provedeno na mikrotvrdoměru LECO (LM-247AT). Naměřené hodnoty byly statisticky zpracované, jako tomu bylo při zpracování tvrdosti.

Vyhodnocení mikrotvrdosti povrchu materiálu 15 128

Na obr. 44 a 45 lze vidět závislost mikrotvrdosti a hloubky zpevnění na řezné rychlosti u materiálu 15 128 při použití 3 a 4 břité frézy. Závislost byla vyjádřena pomocí následujících řezných rychlostí, při kterých byly tyto vzorky obráběny. $v_c = 503 \text{ m.min}^{-1}$, $v_c = 754 \text{ m.min}^{-1}$, $v_c = 1005 \text{ m.min}^{-1}$



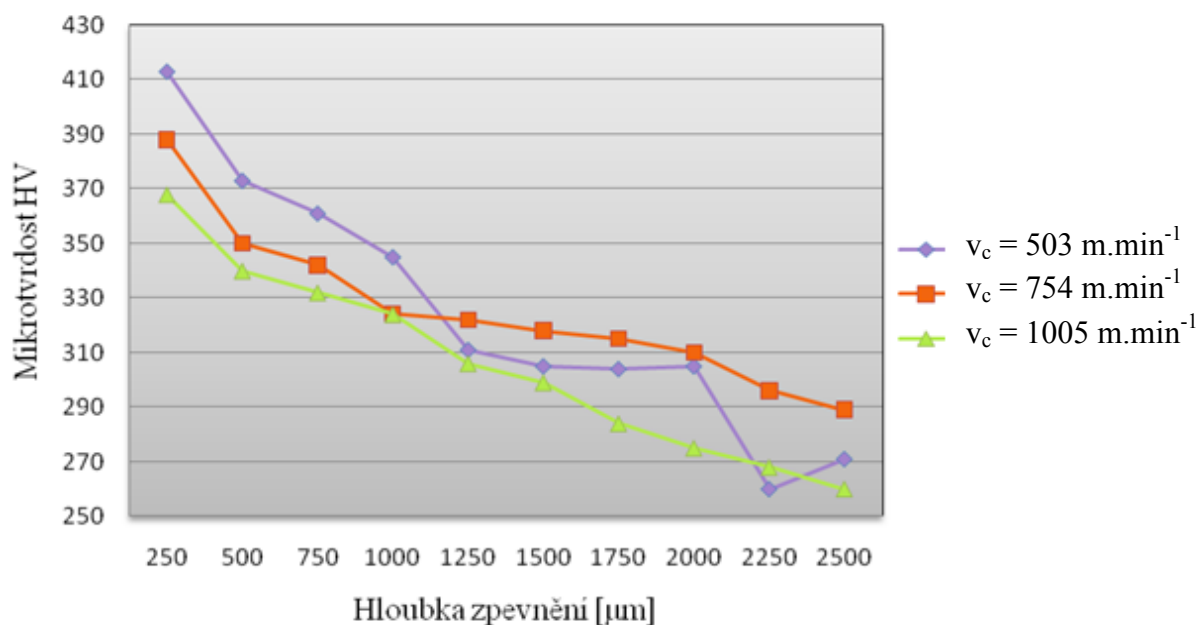
Obr. 44 Závislost mikrotvrdosti a hloubky zpevnění na řezné rychlosti pro mat. 15 128 při použití 3břité frézy.



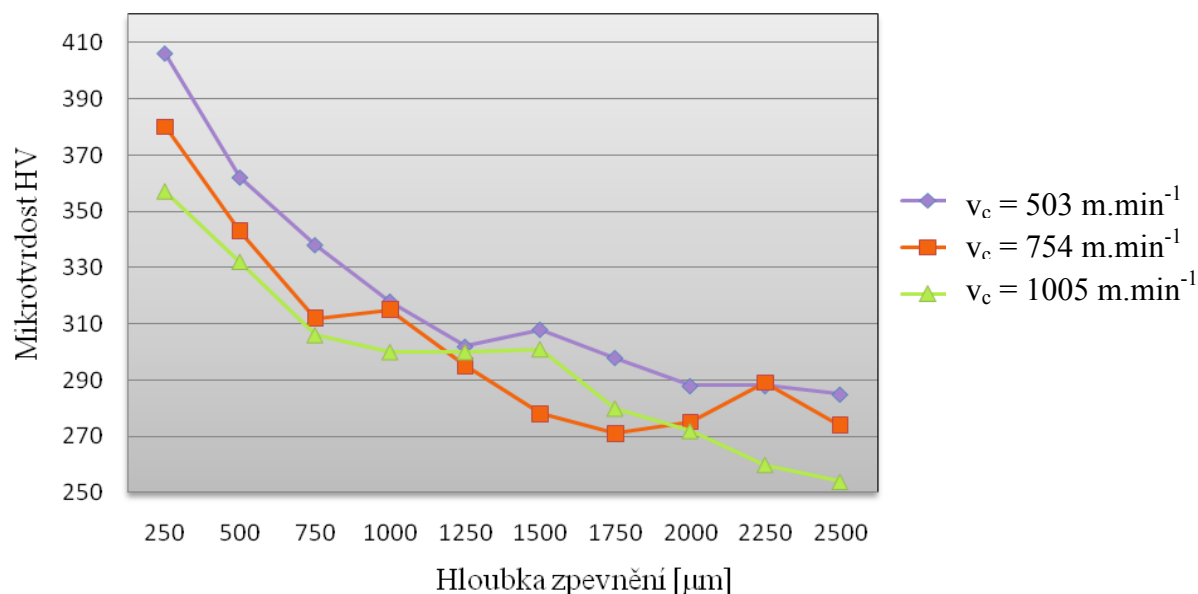
Obr. 45 Závislost mikrotvrdosti a hloubky zpevnění na řezné rychlosti pro mat. 15 128 při použití 4břité frézy.

Vyhodnocení mikrotvrdosti povrchu materiálu ASP 2023

Na obr. 45 a 46 lze vidět závislost mikrotvrdosti a hloubky zpevnění na řezné rychlosti po frézování materiálu ASP 2023 3 a 4břitou frézou. Závislost byla vyjádřena pomocí následujících řezných rychlostí, jež byly při procesu obrábění použity. $v_c = 503 \text{ m.min}^{-1}$, $v_c = 754 \text{ m.min}^{-1}$, $v_c = 1005 \text{ m.min}^{-1}$



Obr. 46 Závislost mikrotvrdosti a hloubky zpevnění na řezné rychlosti pro mat. ASP 2023 při použití 3břité frézy.



Obr. 47 Závislost mikrotvrdosti a hloubky zpevnění na řezné rychlosti pro mat. ASP 2023 při použití 4břité frézy.

5. ZHODNOCENÍ A SHRNUÍ PŘÍNOSŮ PRO PRAXI

Zhodnocení výsledků experimentu pro materiál 15 128

U hodnoceného vzorku materiálu 15 128 se s rostoucí řeznou rychlostí snižuje hodnota mikrotvrdosti v ovlivněné vrstvě materiálu. Nejvyšších hodnot mikrotvrdosti u prvních dvou vpichů v ovlivněné vrstvě bylo dosaženo za použití 3 břitě frézy při řezné rychlosti $v_c = 503 \text{ m.min}^{-1}$. Nejnižších hodnot mikrotvrdosti prvních dvou vpichů bylo dosaženo při řezné rychlosti $v_c = 1005 \text{ m.min}^{-1}$ za použití 4 břitě frézy. Hodnota mikrotvrdosti nás zajímá zejména u prvních dvou vpichů od povrchu materiálu z důvodu jejich umístění. První dva vpichy jsou s jistotou umístěny v ovlivněné vrstvě. U ostatních vpichů nemůžeme říci, že se nachází v ovlivněné vrstvě z důvodu její nerovnoměrnosti.

Zhodnocení výsledků experimentu pro materiál ASP 2023

Z grafu na obr. 46 a 47, který se týká obráběného materiálu ASP 2023 je zřejmé, že průběh výsledků mikrotvrdosti a hloubky ovlivněné vrstvy v závislosti na řezné rychlosti je obdobný jako u předešlého zkoušeného materiálu. I v tomto případě bylo nejvyšších hodnot prvních dvou vpichů dosaženo při řezné rychlosti $v_c = 503 \text{ m.min}^{-1}$ za použití 3 břitě frézy. Nejnižších hodnot mikrotvrdosti prvních dvou vpichů bylo dosaženo při použití 4 břitě frézy a stejné řezné rychlosti jako u zkoušeného materiálu 15 128, která činí $v_c = 1005 \text{ m.min}^{-1}$.

Dosažené výsledky, ze kterých jsou vytvořené grafy pro materiál 15 128 a ASP 2023, odpovídají teorii jen z části. Na základě teorie obrábění vysokými rychlostmi řezání se měl projevit efekt snížení tvrdosti vrstvy materiálu těsně pod povrchem obráběné plochy při zvyšující se řezné rychlosti, oproti rychlosti používané při konvenčním způsobu. Z grafů uvedených pro materiál 15 128 a ASP 2023 vyplývá, že při vyšší řezné rychlosti je dosaženo nižších hodnot mikrotvrdosti, než při nižších rychlostech. Přesnou hranici řezné rychlosti, při které by bylo možno říci, že bude mikrotvrdost vrstvy materiálu nejmenší nelze určit. Toto záleží na vlastnostech obráběného a řezného materiálu. Odborná literatura udává hodnotu tloušťky zpevněné vrstvy na cca 0,5 mm. Právě v tomto se teorie obrábění a provedený experiment neshoduje. Z grafů pro materiál 15 128 a ASP 2023 lze vidět, že tloušťka

zpevněné vrstvy je větší než jak udává teorie. To může být způsobeno např. vlivem vnitřního pnutí.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo ověření vzniku ovlivněné vrstvy materiálu těsně pod povrchem při vysokorychlostním obrábění. Dále bylo porovnáno ovlivnění vrstvy materiálu při konvenčním a vysokorychlostním frézování. Mezi konvenčním a HSC obráběním jsou podstatné rozdíly. Zejména v řezných a posuvových rychlostech, kvalitě obrobené plochy, ale také v pořizovacích a provozních nákladech.

Experiment byl proveden na dvou materiálech. Jednalo se o materiál 15 128 a ASP 2023. Ocel třídy 15 128 se řadí mezi žárovečné a je vhodná pro použití na součásti energetických a chemických zařízení. Materiál ASP 2023 je bezkobaltová rychlořezná ocel určena pro práci za studena. Je vhodná pro výrobu nástrojů na stříhání, ražení a ohýbání. Obrobení uvedených materiálů bylo provedeno v Polsku za asistence Poznan University of Technology. Měření mikrotvrdoti, které bylo potřeba provést pro zjištění ovlivněné vrstvy, bylo provedeno v laboratoři metalografie na VŠB-TU Ostrava.

Podle toho co udává teorie obrábění o zpevnění vrstvy materiálu těsně pod povrchem, se předpokládalo různé ovlivnění této části vrstvy materiálu při použití různých řezných rychlostí. Předpoklad byl takový, že při použití řezné rychlosti konvenčního obrábění bude větší tloušťka ovlivněné vrstvy i její mikrotvrdot. A naopak při využití vysokorychlostního obrábění bude vrstva ovlivněného materiálu menší a zároveň i její hodnota mikrotvrdoti.

Po provedení měření mikrotvrdoti a jejím vyhodnocení se dospělo k výsledku, který odpovídá teorii obrábění jen z části.

Tato diplomová práce může být přínosem pro podniky, které uvažují o zavedení technologie HSC do výroby. V dnešní době je technologie výroby tlačena zkracováním strojních i vedlejších časů při současném zvyšování kvality výrobku. Mezi další požadavky, které jsou kladeny na dnešní výrobní podniky, patří zejména ekologičnost výroby. Technologie HSC tyto uvedené požadavky bezpochyby splňuje. Proto bych doporučoval firmám, které se zabývají obráběním kovů, aby si tuto technologii prozkoumaly v zájmu jejich optimalizace výrobního procesu a tím vyšší konkurenceschopnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SKOPEČEK, Tomáš, et al. *Základy vysokorychlostního obrábění - HSC*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. 136 s. ISBN 80-7043-344-2.
- [2] *Sstmost.cz* [online]. 13.2.2011 [cit. 2011-02-14]. Nové vzdělávací moduly NC technologií. Dostupné z WWW: http://www.sstmost.cz/doc/pdf/nc_metodika_moduly.pdf.
- [3] Vysokorychlostní obrábění – klíč k vyšší produktivitě. *Technický týdeník* [online]. 2010, 7, [cit. 2011-02-14]. Dostupný z WWW: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=6397&mark=>>.
- [4] VASILKO, Karol; HAVRILA, Michal. *Top trendy v obrábění III. část- Technológia obrábania*. SK: MEDIA/ST, 2006. 214 s.
- [5] Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění. *MM Průmyslové spektrum: Nové technologie obráběcích procesů* [online]. 11.12.2002, č. 12, [cit. 2011-02-16]. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni>.
- [6] BRYCHTA, Josef, et al. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Vydání první. Ostrava: Editační středisko VŠB-TUO, 2007 [cit. 2011-02-21]. Dostupné z WWW: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [7] Technologie HSC. *Technik* [online]. 12.8.2002, 8/2002, [cit. 2011-03-03]. Dostupný z WWW: http://technik.ihned.cz/c4-10004030-11353150-800000_d-technologie-hsc.
- [8] MRKVICA, Ivan. *Návody ke cvičení z obráběcích nástrojů: 1.část*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1999. 148 s. ISBN 80-7078-624-8.
- [9] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrav: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [10] BRYCHTA, Josef. *Výrobní stroje obráběcí*. OSTRAVA: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2003 150s. ISBN 80-248-0237-6.
- [11] ZELENÝ, Jaromír. *MM Průmyslové spektrum Special: Vysokorychlostní obrábění*. PRAHA: Vogel Publisching, s.r.o., 2000. 113s. ISBN 80-85986-19-1.

-
- [12] HUŇKA, Radek. *Rešerše nástrojových upínacích rozhraní frézovacích strojů* [online]. Brno, 2010. 46 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28477>.
- [13] Upínače stopkových nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, 4, [cit. 2011-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/upinace-stopkovych-nastroju>>.
- [14] Nová koncepce tepelného upínání nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, 5, [cit. 2011-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-koncepce-tepelneho-upinani-nastroju>>.
- [15] Ekonomické a přesné tepelné upínání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, 3, [cit. 2011-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/ekonomicke-a-presne-tepelne-upinani>>.
- [16] BATORA, Bohumil; VASILKO, Karol. *Obrobene povrch: technologická dědičnost, funkčnost*. Trenčín: GC Tech, 2000. 183 s. ISBN 80-8814-19-1.
- [17] *Vutbr.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-03-22]. Mikrotvrdost. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Obsah.htm>>.
- [18] ČSN EN ISO 4516 (03 8159). *Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse a podle Knoopu*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 17 s.
- [19] *Technotools.de* [online]. 2011 [cit. 2011-04-13]. Fertigung. Dostupné z WWW: <<http://www.technotools.de/html/fertigung.html>>.
- [20] *Dmgczech.com* [online]. [cit. 2011-04-13] Gildemeister Aktiengesellschaft, Bielefeld, Germany. DMU 60 monoBLOCK®/ Highly dynamic, for the shortest cycle time at the highest quality. Dostupný z WWW: <<http://www.dmgczech.com/en,milling,dmu60monoBLOCKnd?opendocument>>.
- [21] *Kennametal.com* [online]. 2011 [cit. 2011-04-14]. Milling Product Catalogs Milling Catalog 6050 -- METRIC. Dostupné z WWW: <http://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/milling_metric_finalr.pdf>.
-

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – F3AH1600ADL30

Příloha 2 – F4AJ1800ADN30